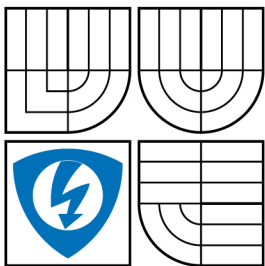


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTICKÝ VLNOVÝ MULTIPLEX

OPTICAL WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEX

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN KAVICKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. MILOSLAV FILKA, CSC.

BRNO 2007

Seznam použitých zkratek a symbolů

ATM.....	Asynchronous transfer mode
AWG.....	Arrayed Waveguide Grating
CWDM.....	Coarse wavelength division multiplexing
DWDM.....	Dense wavelength division multiplexing
EDFA.....	Erbium doped fibre amplifier
FBG.....	Fibre Bragg grating
MM.....	Multimode
SAN.....	Storage area network
WDM.....	Wavelength division multiplexing
WWDM.....	Wavelength division multiplexing

Obsah

1 Úvod	5
1.1 Základní informace	5
1.2 Princip šíření světla optickým vláknem	6
1.2.1 Snellův zákon	6
1.2.2 Totální odraz	7
1.2.3 Navázání optického paprsku do vlákna	7
1.3 Typy optických vláken	7
1.3.1 Jednovidová optická vlákna	8
1.3.2 Mnohovidová optická vlákna	8
1.3.2.1 Vlákná se skokovou změnou indexu lomu	9
1.3.2.2 Vlákná s gradientní změnou indexu lomu	9
2 Metody zlepšování parametrů přenosu	9
2.1 Vláknová odbočnice(coupler)	10
2.1.1 Klasická vláknová odbočnice	10
2.1.2 Hvězdicová vláknová odbočnice	11
2.1.2.1 Přenosová vláknová odbočnice	11
2.1.2.2 Odrazová vláknová odbočnice	12
2.1.3 Optický cirkulátor	12
2.2 Vlnový multiplex(WDM)	12
2.2.1 WDM	14
2.2.2 WWDM	14
2.2.3 DWDM	14
2.2.4 CWDM	15
2.3 Multiplexory a demultiplexory	16
2.3.1 Soustava dielektrických filtrů	16
2.3.2 Vlnovody uspořádané do mřížky	17
2.3.3 Vláknová Braggova mřížka	18
3 Zdroje optického záření	19
3.1 Luminiscenční diody	20
3.1.1 Povrchově emitující	22
3.1.2 Hranově emitující	22
3.2 Laserové diody	22
4 Zesilovače v optické trase	25
4.1 Klasický elektrický opakovač	25
4.2 Optický zesilovač	25
4.2.1 Zesilovač EDFA	26
5 Detektory optických přijímačů	27
5.1 Dioda PIN	28
5.2 Fotodiody APD	28

6 Praktické ověření vlastností optického přenosu	29
6.1 Odstup vlnových délek jednotlivých vidů.....	29
6.2 Zesílení zesilovačem EDFA.....	30
6.3 Vydělování a vkládání vidu.....	32
7 Závěr	33
Literatura	35

1 Úvod

V dnešní době mobilních telefonů a internetu, přenosová rychlost a šířka přenosového pásma jsou jedny z prvních věcí, které zákazníka zajímají. Proto se vývoj technologií z velké části zabývá možnostmi řešení, jak tyto parametry přenosových médií zvýšit. Zde budou uvedeny různé technologie a zařízení, které pomáhají tyto přenosové parametry vylepšit. V tomto dokumentu se zaměříme na technologie spojené s přenosem informace po optickém vlákně. Pro představu to jsou různé typy technologie WDM, multiplexory a demultiplexory, optické zesilovače a opakovače a jiné.

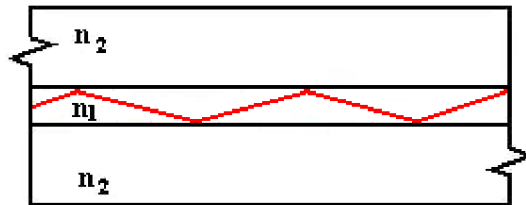
1.1 Základní informace

Na úvod si řekněme pár základních informací o samotném přenosovém médiu optických sítí. Optické vlákno umožňuje přenos světelné energie mezi optickým vysílačem a přijmačem bez nutnosti přímé viditelnosti. Dá se snadno ohýbat kolem překážek, je zde zamezeno pronikání okolního světla do jádra a rušení je minimální. První pokusy o komunikaci dvou zařízení po optickém vlákně se uskutečnili již v 50. a 60. letech. Bohužel, kvůli velkému útlumu se nedaly tyto vlákna použít. Významnější pokroky zaznamenalo optické vlákno v 80. a 90. letech. Po optickém vlákně můžeme přenášet buď digitální, nebo i analogový signál. V praxi se však používá digitální signál.

Optické vlákno má oproti metalickému vedení velmi malý útlum a to asi 1000 násobně. Dokáže překlenout vzdálenosti 70 – 100km bez nutnosti regenerace signálu a navíc může přenášet velkou šířku pásma. Nedochází zde k elektrickému, či magnetickému rušení, ani k přeslechům. Také je téměř odolné proti odposlechům. K tomu může dojít pouze když vlákno zkroutíme a pak signál, který vyskočí z vlákna, zachytíme na přijimači. Příjmač i vysílač jsou galvanicky odděleny, takže odpadají problémy se společným zemněním. Naproti tomu se však optická vlákna složitěji konektují, což má za následek vysokou cenu konektorů. Jsou zde vysoké nároky na čistotu a kvalitu spojů. V následujících kapitolách je čerpáno z pramene [12].

1.2 Princip šíření světla optickým vláknem

Světlo je množina optických paprsků. Na začátku přenosu je potřeba jednotlivé paprsky do vlákna navázat a ty se pak vláknem šíří ve směru osy vlákna s využitím principu totálního odrazu. Plášť zde zajišťuje potřebný rozdíl indexu lomu a izoluje vlákno od prostředí. Označíme-li index lomu jádra n_1 a index lomu pláště n_2 , pak musí platit, že $n_1 \geq n_2$. Na rozhraní těchto dvou materiálů dochází k totálnímu odrazu a paprsek se tak šíří vláknem.



Obr. 1.1: Šíření paprsku v optickém vlákně

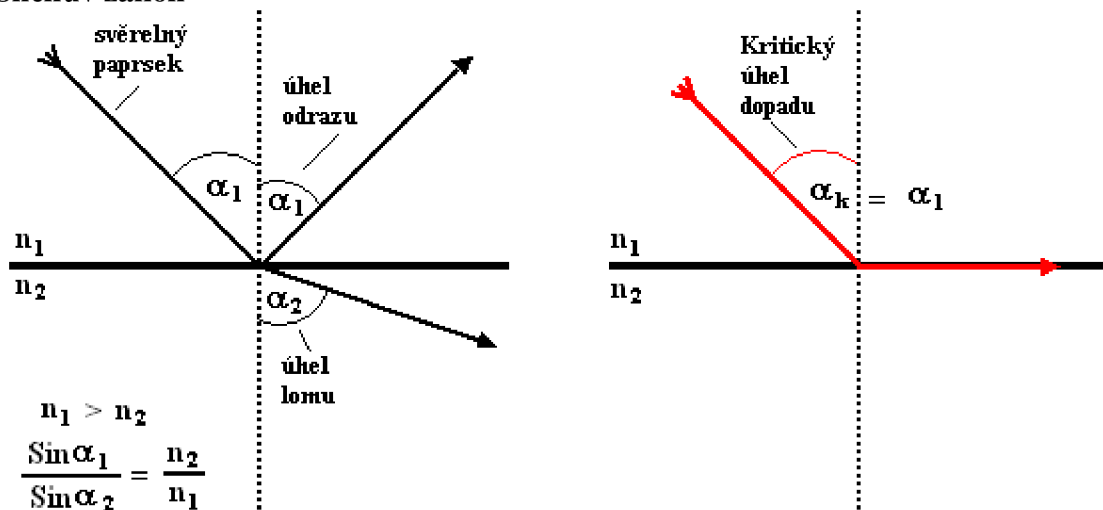
Pro každé prostředí určíme tzv. Index lomu. $n = \frac{c}{v}$

c – rychlost světla ve vakuu

v – rychlost světla v daném prostředí

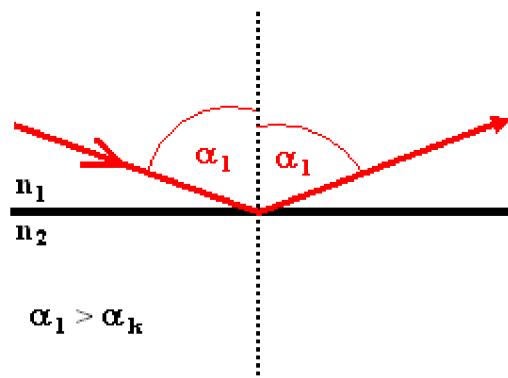
n – bezrozměrná veličina, vyjadřující kolikrát je rychlost světla v daném prostředí menší než rychlost světla ve vakuu

1.2.1 Snellův zákon



Obr. 1.2: Snellův zákon

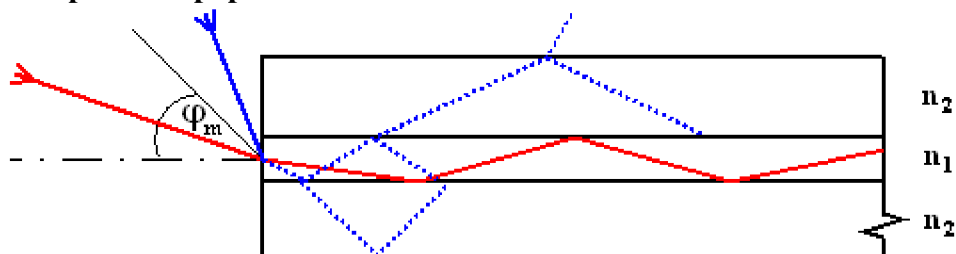
1.2.2 Totální odraz



Obr. 1.3: Totální odraz

Tohoto jevu se využívá při přenosu paprsků optickým vláknem.

1.2.3 Navázání optického paprsku do vlákna



Obr. 1.4: Navázání paprsku do vlákna

φ_m je mezní úhel navázání (maximální úhel), pod kterým musí paprsek dopadnout na rozhraní vzduch – n_1 , aby uvnitř vlákna došlo na rozhraní $n_1 - n_2$ k totálnímu odrazu. Pokud tato podmínka nebude splněna, paprsek se uvnitř vlákna odrazí do pláště a tam zanikne.

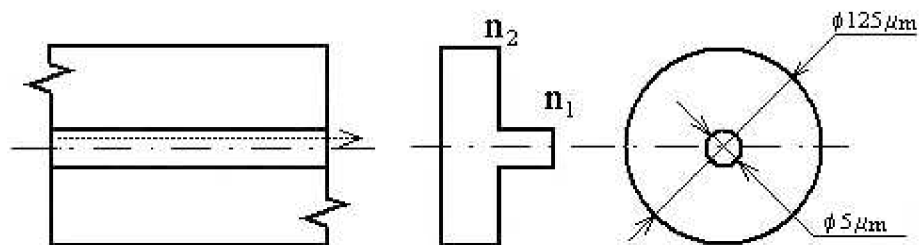
1.3 Typy optických vláken

Základní rozdělení optických vláken je :

- 1) jednovidová
- 2) vícevidová :
 - a) se skokovou změnou indexu lomu
 - b) s gradientní změnou indexu lomu

1.3.1 Jednovidová optická vlákna

Po tomto vlákne přenášíme jeden vid. Jádro vlákna má rozdílný index lomu, než plášť. Vid se šíří téměř rovnoběžně s osou vlákna, což má za následek menší úniky energie mimo vlákno. Poměr průměrů jádra a pláště bývá $5\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$. Tyto vlákna jsou vhodnější z hlediska šíření díky menšímu průměru. Tím dopadá paprsek na rozhraní s velkým úhlem, dochází tak k téměř malému prodloužení trajektorie paprsku a k malému úniku do pláště. Útlum je v rozsahu $0,35 - 0,2\ \text{dB/km}$ a součinitel šířky pásma se pohybuje v řádu stovek GHz/km. Vyrábějí se tažením z homogenní skloviny. Oproti mnohavidovým vláknům jsou cenově dražší. Tyto vlákna se používají na dlouhé mnohakilometrové dálkové trasy v telekomunikacích. Dosahuje se na nich vysokých přenosových rychlostí a jako zdroje optického záření se používají polovodičové lasery.



Obr. 1.5: Jednovidové optické vlákno

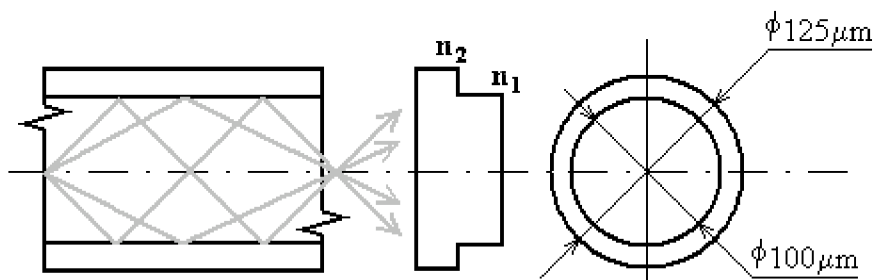
1.3.2 Mnohavidová optická vlákna

Velký průměr jádra způsobuje dopadání paprsků na rozhraní pod malými úhly a jejich dráhy se prodlužují a jsou různě dlouhé. Materiál vlákna je nehomogenní, což způsobuje různou rychlost šíření paprsků v různých směrech. Tento jev způsobuje tzv. módovou disperzi a omezuje šířku přenášeného pásma.

Tyto vlákna dělíme na dva poddruhy:

- se skokovou změnou indexu lomu
- s gradientní změnou indexu lomu

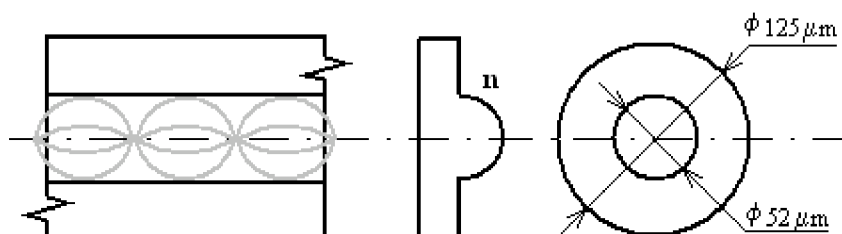
1.3.2.1 Vlákna se skokovou změnou indexu lomu



Obr. 1.6: Mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu

Útlum signálu je v rozmezí 2,6 – 50 dB/km. Součinitel šířky pásma je 6 – 50 MHz/km. Tyto vlákna se používají na krátké trasy mezi místnostmi, nanejvýš mezi budovami.

1.3.2.2 Vlákna s gradientní změnou indexu lomu



Obr. 1.7: Mnohavidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu

Útlum signálu se pohybuje v rozmezí 2 – 10 dB/km. Součinitel šířky pásma je roven 300 MHz/km až 1,5 GHz/km. Používají se v lokálních počítačových sítích LAN.

2 Metody zlepšování parametrů přenosu

Jak už bylo řečeno, zákazníka zajímá hlavně rychlost přenosu a šířka kanálu optického vlákna. Metodami zlepšování těchto parametrů se začneme zabývat, pokud potřebujeme zvýšit přenosovou kapacitu optického vlákna, nebo sdílet přenos více aplikací po jednom vlákně, nebo pokud zřizujeme nové optické připojení a přitom narazíme na problém malého počtu vláken u zákazníka a nemáme možnost natáhnout nové optické vlákno. V této kapitole čerpáno z pramene [10].

Máme několik možností řešení:

- využít vláknovou odbočnici (coupler)
- užití optických cirkulátorů
- vlnový multiplex (WDM)

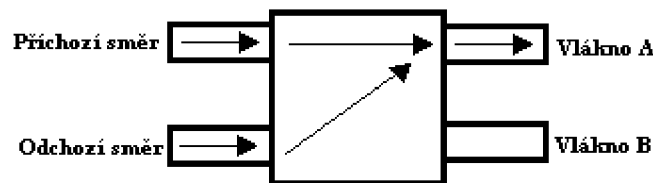
2.1 Vláknová odbočnice (coupler)

Vláknová odbočnice je jednoduché pasivní zařízení, které nevyžaduje napájení, a je schopno jeden či více signálů sloučit či rozdělit do jednoho či více vláken. V optických sítích jsou nejvíce používány tyto druhy odbočnic: - klasická vláknová odbočnice

- hvězdicová odbočnice: - přenosová odbočnice
- odrazová odbočnice

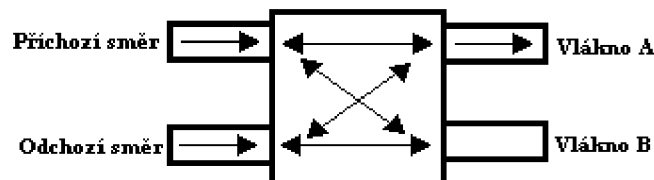
2.1.1 Klasická vláknová odbočnice

Tato technologie je vhodná, pokud máme na provozované optické trase dostatečnou rezervu v optickém výkonu, aby se redukovalo zeslabení procházejícího signálu (o 7 – 8dB), což se taky může řešit dobrým návrhem řešení a komponenty. Coupler se připojí na příchozí a odchozí směr v poměru 50/50% a signály z těchto cest jsou pak sloučeny do jednoho vlákna. To způsobí uvolnění druhého vlákna a proto na něj můžeme tuto technologii aplikovat také. Poměr můžeme volit mezi 50/50%, 70/30%, 90/10%. Coupler je nezávislý na protokolu a přenosových rychlostech. Připojovat se mohou jednovláknová (9/125 μ m), či vícevláknová optická vlákna (50/125 μ m nebo 62,5/125 μ m).



Obr. 2.1: Klasická vláknová odbočnice

Na obrázku 2.1 je uvedena 4-portová vláknová odbočnice. Je zde znázorněno, jak je příchozí i odchozí signál spojen do jednoho vlákna. Tento typ coupleru má možnost volit mezi osmi různými směry chodů signálu.



Obr. 2.2: Možné směry chodu signálů

Realizace coupleru je taková, že se vlákna svařují a přibližují k sobě, až jsou jádra vláken tak blízko u sebe, že se začne objevovat spojení. V praxi to vypadá tak, že se vlákna zkroutí a následně jsou svařeny. Vlákna jsou pak změkčena a spojena. Princip výroby závisí na tom, zda-li se jedná o jednovidová či vícevidová vlákna.

Využití klasické vláknové odbočnice:

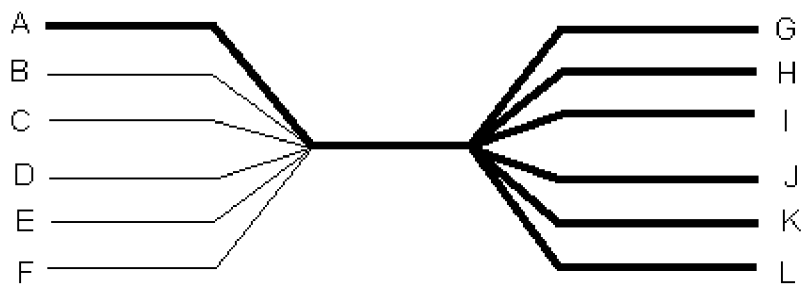
- pro provoz plně duplexního provozu na jediném optickém vlákně
- možnost napojení protokolového analyzátoru
- na kratších vzdálenostech na vícevidových MM vláknech pro technologie 10 Mbit/s a 100 Mbit/s Ethernetu
- na jednovidových SM vláknech
- pro průmyslové přenosy sběrnic typu RS485 a RS232
- k propojení telefonních ústředěn pomocí linky E1 respektive ISDN

2.1.2 Hvězdicová vláknová odbočnice

Tyto odbočnice mají více jak čtyři porty. Jsou to zařízení, která příchozí signál rozdělí na několik dílčích výstupních signálů. Jsou používány jako součásti multiplexoru typu AWG.

2.1.2.1 Přenosová vláknová odbočnice

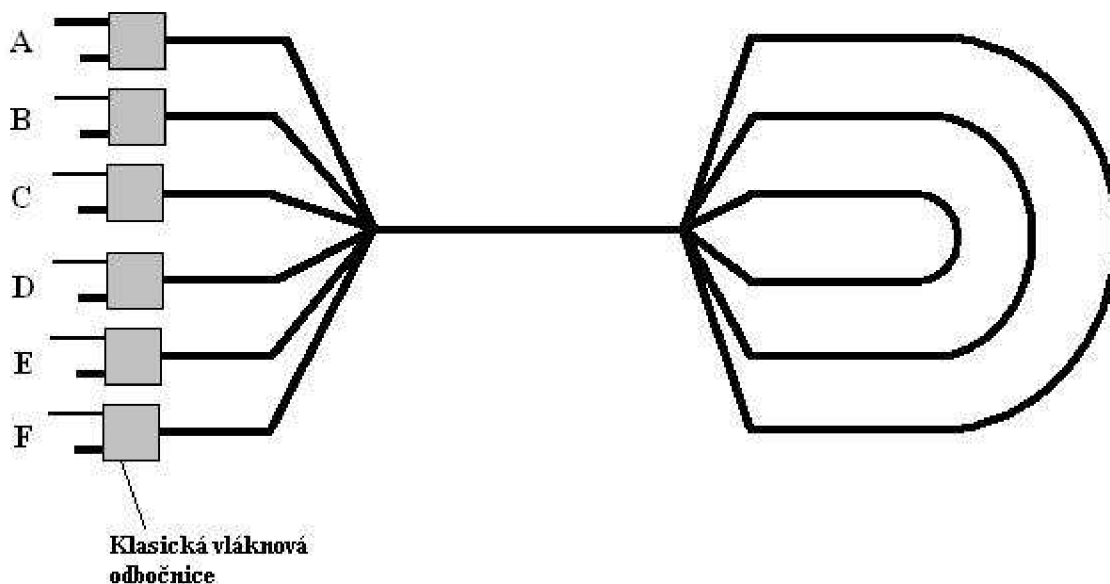
Tato odbočnice rovnoměrně rozdělí signál z kteréhokoli vstupu na všechny výstupy.



Obr. 2.3: Přenosová vláknová odbočnice

2.1.2.2 Odrazová vláknová odbočnice

Signál přicházející na kterýkoli vstup je rovnoměrně rozdělen a následně vrácen na všechny vstupy.



Obr. 2.4: Odrazová vláknová odbočnice

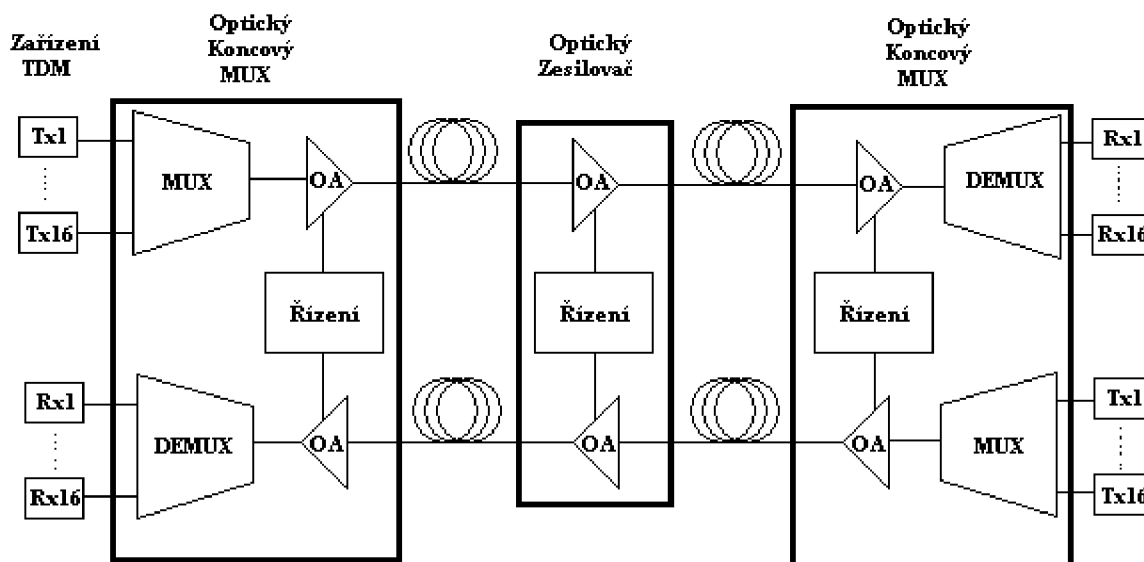
2.1.3 Optický cirkulátor

Tato technologie je téměř shodná s technologií vláknové odbočnice. Má však výhodu v tom, že vstupní útlum je menší, tudíž nepotřebujeme velkou rezervu. Tato výhoda je ovšem splacena vyšší cenou.

2.2 Vlnový multiplex (WDM)

Jedním z hlavních úkolů přenosové techniky je sdružování různých signálů a následné přizpůsobení sdruženého signálu pro přenos přes přenosové prostředí. Pro sdružování více optických signálů o různých vlnových délkách a následný paralelní přenos po jediném vlákne, se hojně využívá optický vlnový multiplex. Tím, že signály jsou přenášeny paralelně, každý signál poskytuje plnou šířku pásma, kterou doposud poskytovalo celé optické vlákno. Tato metoda má svůj základ ve frekvenčním sdružování kanálů ze základního pásma do vysokofrekvenčních skupinových signálů. Pro optickou verzi této technologie se používá technologie WDM, WWDM,

DWDM a CWDM, z nichž se nejvíce používá technologie DWDM. Dále každá vlnová délka navíc může přenášet jiný uživatelský přenos s různou přenosovou rychlostí a formátem (ATM, Ethernet, SAN a jiné), což před příchodem WDM vůbec nebylo možné. Klasická sestava optického přenosového systému s technologií WDM sestává z vlnového multiplexoru, vlnového zesilovače a vlnového přepínače. V této kapitole a podkapitolách je čerpáno z pramenů [2], [10], [13]



Obr. 2.5: Optický přenosový systém

Na obr. 2.5 je znázorněno blokové schéma obousměrného 16-ti kanálového systému.

V našem případě se skládá z vlnového multiplexu, vlnového zesilovače a zdrojů vlnových délek.

Vlnové délky jsou vybírány z množiny vlnových délek doporučené směrnici

ITU-T G.692. Na tyto nosné vlnové délky je namodulována přenášená informace. Vlnové délky pak jdou do multiplexoru, kde jsou zkombinovány do jednoho signálu.

Multiplexor může představovat pasivní prvek. Například směrová odbočnice zapojená v opačném směru. Poslední částí zařízení je optický zesilovač, který zesílí signál před samotným transportem po vlákne. Optické vlákno má malý útlum, tudíž zesílení optického signálu je nutné nejdříve po 50-ti až 100 km od vysílače. Pak musíme signál znovu zesílit. Takto můžeme signál zesílovat bez nutnosti regenerace až do vzdálenosti asi 640 km, přičemž se musí použít asi sedmi mezilehlých zesilovačů. V přijímači je signál zesílen pomocí předzesilovače a následně rozdělen na individuální signály pomocí demultiplexoru.

Optický zesilovač má výhodu v tom, že zesiluje všechny kanály najednou a plně opticky. Bohužel zde dochází k narůstání šumu podél trasy.

Frekvence jsou celočíselnými násobky 100 GHz od 192,1 THz do 196,1 THz. Máme tedy na výběr z 41 různých vlnových délek vzdálených od sebe asi 0,8 nm. Mluvíme proto o hustém vlnovém multiplexu DWDM.

2.2.1 WDM

Tato technologie je základem ostatních technologií. Je to původní vlnový multiplex. Pro přenos se používají jen dvě nebo tři vlnové délky nejčastěji v obousměrném provozu na jednom vlákne. Sdružování umožňuje pasivní součástka multiplexer, která nám tyto vlnové délky spojí v jednu. Každá vlnová délka představuje optický kanál. Tato technologie se vyvinula do toho bodu, kdy oddělení jednotlivých vlnových délek je v řádu nanometrů. Vícevidové aplikace na MM vlákne užívají kombinaci vlnových délek 850 nm a 1300 nm. Jednovidová pak kombinaci 1310 nm a 1550 nm.

Využití WDM:

- V systémech s distribucí videosignálu s kombinací vlnových délek 1310 nm a 1490 nm a 1550nm.
- Pro přenos dat.
- Pro videosignál.

2.2.2 WWDM

Jedná se o široký vlnový multiplex, kdy se používají vlnové délky z rozsahu 850 nm a z rozsahu 1300 nm. Odstup jednotlivých vlnových délek je 25 nm.

Využití WWDM: - V systémech Gigabitového a 10 Gigabitového Ethernetu.

2.2.3 DWDM

Hustý vlnový multiplex je efektivní metoda, kde je několik kanálů, každý o jiné vlnové délce, přenášeno jedním optickým vláknem, využívající více z dostupné šířky pásma, bez zvyšování efektu disperze. Každý kanál může být nezávislý na protokolu, rychlosti a směru komunikace. DWDM také pomáhá realizovat celooptickou síť, kde jsou signály směrovány bez nutnosti elektro-optického převodu. Tento typ sítě je potenciálně rychlejší a flexibilnější a může být, v porovnání s

ostatními metodami, levnější. Je to nejpoužívanější metoda. Vlnové délky jsou vybírány z doporučení ITU-T G.694.1 v rozsahu od 1490 nm do 1620 nm (S, C a L pásmo) s odstupem jednotlivých kanálů 100 GHz, což je odstup cca 0,8 nm. Takto je možno přenášet paralelně 32, 64, nebo nově až 96 vlnových délek. Každá vlnová délka pak je schopna přenášet signál rychlostí 2,5Gbit/s, nebo 10Gbit/s. Šířka pásma vlákna pak dosahuje až 1Tbit/s. Můžeme také použít dvojnásobný počet kanálů, který bude mít odstup jednotlivých frekvencí 50 GHz.

Využití DWDM:

Technologie DWDM je použita nejvíce na dálkových optických trasách. Je nutné jako zdroje záření použít přesné laserové chlazené zdroje a další náročné optické prvky například optické zesilovače EDFA, cirkulátory atd.

2.2.4 CWDM

Tato metoda je velmi podobná metodě DWDM. Rozdíl je ve větším odstupě jednotlivých kanálů, což snižuje celkovou kapacitu vlákna, a vlnové délky jsou vybírány na základě doporučení ITU-T G.694.2 z rozsahu 1270 nm až 1610 nm s odstupem 20nm, což představuje 20 kanálů. Kvůli většímu odstupě je CWDM vhodnější na krátké vzdálenosti (cca 50 km po jednovidovém vlákně). Díky tomu je levnější oproti DWDM se stejným počtem kanálů.

Využití CWDM:

- Má uplatnění u kabelových společností, nebo u velkých podnikových sítí.
- K propojení poboček firem a také řeší propojení SAN.
- Dostupnější a levnější technologie.
- Snadné použití se stávajícími prvky.
- Snadná konfigurace a rozšiřování.

Další porovnání mezi DWDM a CWDM je zobrazeno v následující tab. 1.

Tab. 1: Porovnání technologie DWDM a CWDM

Aplikace/parametr	CWDM - metropolitní přístup	DWDM - metropolitní, regionální síť	DWDM - dálkové spoje
Kanály a vlákno	4-16	32-80	80-160
Použité spektrum	pásma O,E,S,C,L	pásma C,L	pásma C,L,S
Vzdálenost mezi kanály	20 nm (2500 GHz)	0,8 nm (100 GHz)	0,4 nm (50 GHz)
Kapacita vlnové délky	1,5 Gbit/s	10 Gbit/s	10-40 Gbit/s
Kapacita vlákna	20-40 Gbit/s	100-1000 Gbit/s	Tbit/s
Typ laseru	nechlazený DFB (Distributed-Feedback Laser)	chlazený DFB	chlazený DFB
Dosah	do 50-80 km	stovky km	tisíce km
Optický zesilovač	žádný	EDFA (Erbium-Doped Fibre Amplifier)	EDFA, Raman

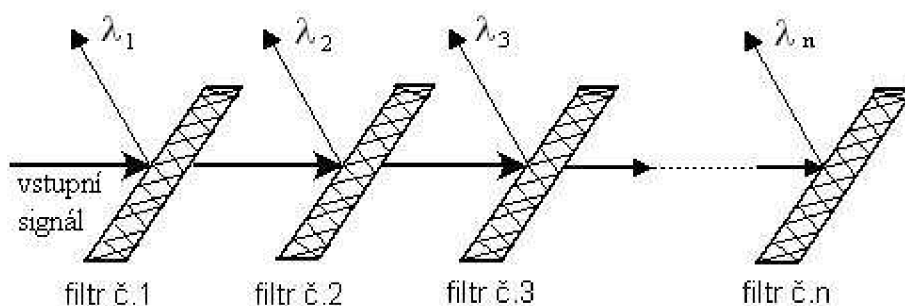
2.3 Multiplexory a demultiplexory

Multiplexory jsou jednou z hlavních součástí optických přenosových systémů. Jsou to jednoduchá pasivní zařízení, jejichž úkolem je sloučit několik dílčích optických signálů do jednoho výsledného optického signálu, který je pak přenášen po optickém vlákně k demultiplexoru, kde je tento signál znovu rozčleněn na dílčí signály.

Tato zařízení můžeme realizovat třemi způsoby:

1. Soustavou dielektrických filtrů
2. Vlnovody uspořádanými do mřížky (AWG – Arrayed Waveguide Grating)
3. Vláknovou Braggovou mřížkou (FBG – Fibre Bragg Grating)

2.3.1 Soustava dielektrických filtrů



Obr. 2.6: Soustava dielektrických filtrů

Demultiplexor realizován tímto způsobem funguje tak, že optický signál dopadá na filtr, který propustí jeden optický kanál na přijímač. Zbytek signálu je odražen na další filtr, kde je opět propuštěn pouze jeden optický signál. Tímto způsobem je odfiltrován původní optický signál na dílčí optické signály.

2.3.2 Vlnovody uspořádané do mřížky (AWG – Arrayed Waveguide Grating)



Obr. 2.7 Vlnovody uspořádané do mřížky - AWG

Jsou to (de)multiplexory optických vlnových délek používané v technologii DWDM. Někdy se jim také říká Optické fázové pole, nebo Vlový router. Jak vidíme na obrázku, zařízení sestává z dvou hvězdicových vláknových odbočnic. První odbočnice rozvětjuje vstupní signál do dílčích optických vlnodů (počet optických kanálů je roven počtu větví), které jsou velikostí podobné původnímu optickému vláknu. Větve jsou pak vedeny paralelně vedle sebe v soustředných obloucích a pak jsou napojeny na druhou vláknovou odbočnici. Oblouky jsou nestejně dlouhé, což způsobí rozdílnou fázi částí signálu. Výkon světla, který je spočítán z přesných geometrických parametrů a indexů lomu struktury AWG, vstupující do první vláknové odbočnice, se rovnoměrně rozdělí do všech úzkých větví vlnovodu. Následkem různých fází jednotlivých částí signálu dojde ve druhé odbočnici k vzájemné interferenci a celkový signál WDM se rozdělí tak, že každá jednotlivá část WDM signálu se s plnou intenzitou rozdělí na jednotlivé výstupní větve.

2.3.3 Vláknová Braggova mřížka (FBG – Fibre Bragg Grating)

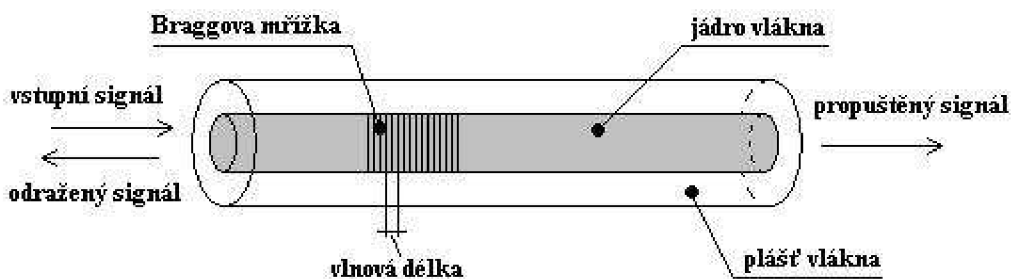
Vláknové mřížky jsou pro své spektrální vlastnosti stále častěji používanými optickými prvky v telekomunikacích. Mřížka je zkonstruována opakovanými změnami indexu lomu jádra vlákna. Princip je velmi podobný soustavě dielektrických filtrů. K odrazu vstupní vlny od mřížky dojde tehdy, pokud je její vlnová délka přibližně rovna Braggově rezonanční vlnové délce. Pokud tato podmínka není splněna, optická vlna projde mřížkou. Braggova mřížka je realizována osvitěním vlákna s fotocitlivým jádrem přes masku. Důsledkem je vyzařování frekvenčních pásem do různých směrů a pro zachycení je nutné správné situování detektorů tak, aby na ně dopadal signál o správné nosné frekvenci. Vztah mezi Braggovou rezonanční vlnovou délkou a periodou mřížky je:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda$$

λ_{Bragg} – Braggova rezonanční vlnová délka

Λ – perioda mřížky

n_{eff} – efektivní vidivý index



Obr. 2.8: Vláknová Braggova mřížka - FBG

Multiplexory jsou realizovány stejnými technologiemi jako demultiplexory. Jako příklad můžeme použít například metodu AWG v opačném uspořádání. Pustíme-li jednotlivé optické signály do této struktury v opačném směru, dostaneme na výstupu WDM signál [2].

Jako multiplexor může být také použita směrová odbočnice mající spektrálně dostatečně plochou charakteristiku. To je nutné, aby výkon z jedné vstupní větve nebyl více utlumen, než výkon z druhé vstupní větve, při navázání do jednoho vlákna.

3 Zdroje optického záření

Pro takové metody přenosu, jako je například technologie DWDM, potřebujeme velmi přesný zdroj optického záření. Z toho důvodu, jsou na tato zařízení kladeny velké nároky. Velké požadavky na přesnost zařízení však s sebou přinášejí i náročnou výrobu a tudíž i vyšší cenu. Největší požadavky jsou kladeny na tyto parametry:

1. výkon
2. přenosová rychlost
3. nominální poloha středu spektrální čáry a její šířka
4. šum

Níže se budeme zabývat jednotlivými parametry.

1. Výkon

Výkon zdroje optického záření musí být takový, aby signál, po projití optické trasy, byl na konci vlákna detektorem, s požadovanou přesností, detekovatelný.

2. Přenosová rychlost

Zde hraje velmi důležitou roli modulace optického zdroje. Pokud zdroj nemá schopnost takové modulace, kterou potřebujeme, neposkytne nám ani potřebnou rychlost.

3. Nominální poloha středu spektrální čáry a její šířka

Technologie WDM jsou velmi náročné na stabilitu jednotlivých nosných frekvencí. Velmi důležité je, aby se nosná frekvence, důsledkem změn teploty a dalších jiných vlivů, neposouvala do jiných přenosových kanálů. Důležitá je také šířka nosné frekvence. Ta by neměla zasahovat do vedlejších přenosových kanálů.

4. Šum

Důležité je, aby zdroj při vysílání nengeneroval náhodné frekvence. Tento jev se jmenuje fluktuace.

Další obecné požadavky jsou nezávislost na okolí (například změna teploty), mechanická odolnost, spolehlivost zařízení, dlouhá životnost a cena. Jako zdroje optického záření v optických sítích se používají laserové a luminiscenční diody.

Jako zdroje záření se nejčastěji používají:

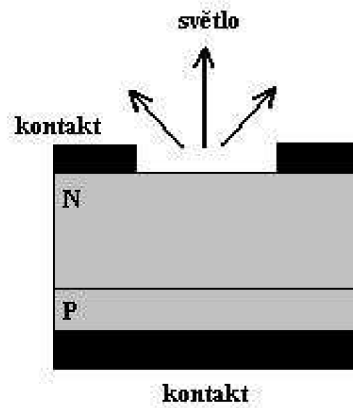
1. Luminiscenční diody
2. Laserové diody

3.1 Luminiscenční diody(LED-Light Emitting Diode)

LED je zdrojem nekoherentního záření. Fyzikální princip luminiscenční diody je založen na rekombinaci, tzn. rekombinuje-li elektron s dírou, odevzdává energii zhruba rovnou šířce zakázaného pásu. Injekcí majoritních nosičů do polovodiče opačné vodivosti, při přiložení napětí na PN přechod v propustném směru, se zvýší pravděpodobnost rekombinace a často k ní dochází. Při rekombinaci každého páru elektron – díra se uvolní určité kvantum energie, které se může buď vyzářit mimo krystal, nebo být absorbováno v mříži, což se projeví zvýšenou teplotou krystalu. Pravděpodobnost zářivé rekombinace je mnohonásobně větší pro polovodiče s tzv. přímým přechodem. U polovodičů s nepřímým přechodem jsou polohy maxima a minima posunuty (např. Si). Pravděpodobnost zářivé rekombinace dále roste se zvětšující se šířkou zakázaného pásu. U křemíku, s šířkou zakázaného pásu 1.1 eV, je uvolňovaná energie převážně absorbována v krystalu, ze kterého je odváděna přes pouzdro diody do okolního prostředí. Vyrobit-li diodu z GaAs, který má šířku zakázaného pásu 1.34 eV, bude již nezanedbatelná část energie rekombinace vyzařována ve formě fotonů o příslušné vlnové délce, která však ještě spadá do oblasti neviditelného infračerveného záření. Kombinací tohoto materiálu s fosforem, tzv. galium arzenid fosfid, GaAsP, získáme již materiál, který, je-li z něj vytvořen PN přechod, vyzařuje červené viditelné záření. Použijeme-li materiál o vhodné šířce zakázaného pásu, můžeme vytvořit diody svítící v propustném směru světlem zeleným, žlutým nebo oranžovým. Další používané materiály jsou GaP, GaAlAs (červená), InGaP, SiC (zelená, modrá). Při aplikaci svítivých diod stačí zapojit diodu v propustném směru přes vhodný odpor na zdroj napětí. Proud diodou na dosažení vhodné intenzity světla je třeba vyčíst z katalogu, řádově se jedná o proudy 10 až 20 mA i více [4], [5].

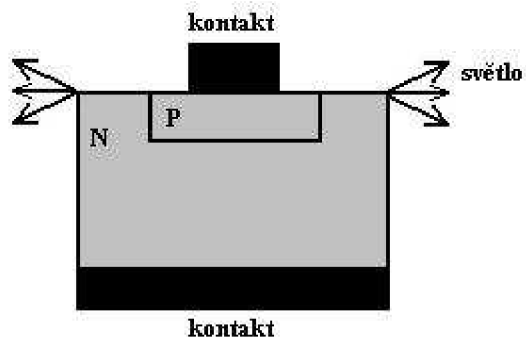
LED diody můžeme vyrábět ve několika základních podobách:

- povrchově emitující



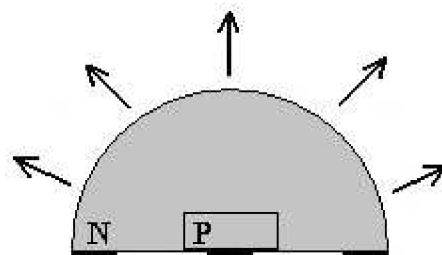
Obr. 3.1: Povrchově emitující dioda

- hranově emitující



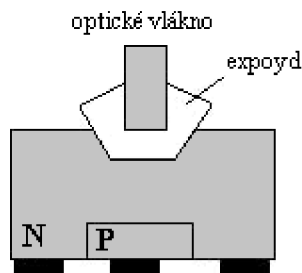
Obr. 3.2: Hranově emitující dioda

- půlkruhová MESA dioda



Obr. 3.3: Půlkruhová MESA dioda

- Burrusova dioda



Obr. 3.4: Burrusova dioda

3.1.1 Povrchově emitující

Diody tohoto typu jsou mechanicky odolné, spolehlivé, levné, jejich výroba je jednoduchá, a životnost dlouhá. Maximální emitovaný výkon umožňuje dosáhnout modulační rychlosti kolem 100MBd/s. Nevýhodou je neschopnost dosáhnout vyšších modulačních rychlostí cca 500MBd/s, kterých lze dosáhnout pouze při nižším emitovaném výkonu. Další nevýhodou je široká spektrální čára, která má šířku více než 100nm, znemožňující použití v systémech WDM [4], [5].

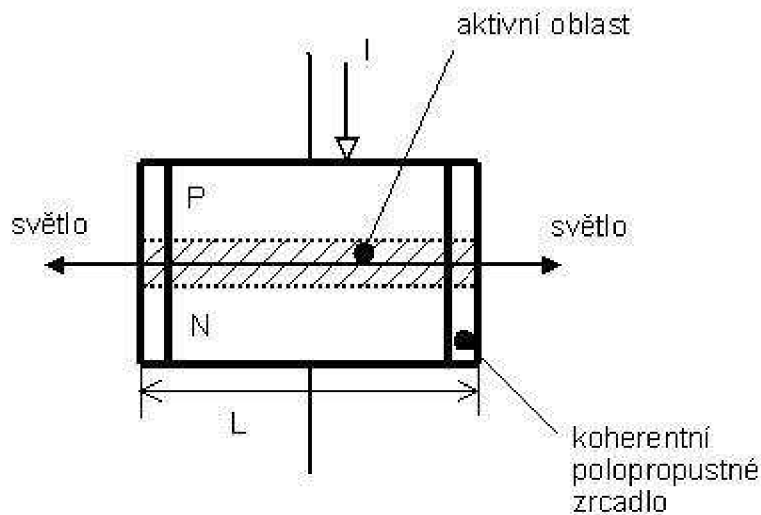
3.1.2 Hranově emitující

Svou strukturou se hranově emitující diody velmi podobají laserovým diodám s odstraněnými zrcadly. Větší emitovaný výkon s užší spektrální čarou znamenají složitější přípravu při výrobě. Bohužel ani tento typ diod není schopný dosáhnout požadovaných výkonů a jejich spektrální čáry jsou příliš široké [4], [5].

3.2 Laserové diody(LD-Laser Diode)

Základem funkce všech laserů je proces stimulované emise. U polovodičových laserů – laserových diod je však tento proces specifický v tom, že v polovodičových krystalech jsou aktivní atomy hustě vedle sebe a zářivé přechody se neuskutečňují mezi diskontinuálními energetickými hladinami, ale mezi energetickými pásy. Elektrony obsazují nejnižší energetické hladiny ve vodivosti u pásu až po Fermiho kvazi hladinu pro elektrony E_{fn} . Stavů ve valenčním pásu jsou bez elektronů až po Fermiho kvazi hladinu pro díry E_{fp} . Při dopadu fotonů na polovodič s energií větší než E_g , ale menší než $E_{fn} - E_{fp}$, nemůže dojít k jejich absorpci, protože hladiny, na něž by se mohl uskutečnit přechod spojený s pohlcením fotonu, jsou již obsazeny. Dopadající fotony tedy mohou stimulovat přechody elektronů z vodivostního do valenčního pásu s následnou emisí.

Aktivní prostředí v injekčních polovodičových laserech vzniká při injekci elektronů a děr z přechodu PN, nebo z heteropřechodu. Ke generování optického záření pak dochází, jak je tomu i ve všech generátorech, v důsledku zavedení kladné zpětné vazby, která část zesíleného signálu z výstupu přivádí na vstup. K tomuto účelu se používají různé typy rezonátorů, selektivních odražečů, nebo rozložené zpětné vazby. V současnosti je nejužívanějším rezonátorem v polovodičových laserech Fabry – Perotův rezonátor. Vzhledem k tomu, že poměrný index lomu rozhraní polovodičový krystal – vzduch má poměrně vysokou hodnotu, nemusíme u injekčních polovodičových laserů používat speciální zrcadla, stačí využít odrazu elektromagnetické vlny od rozhraní. Podmínkou realizace takového rezonátoru je pak vzájemná rovnoběžnost dvou protilehlých stěn polovodičového laseru a jejich kolmost k rovině přechodu PN. V kubických krystalech se zrcadla rezonátoru získávají štípáním orientovaných polovodičových destiček s přechodem PN podél krystalografických rovin. Při nízkých proudech, tekoucích přes přechod PN v přímém směru, dochází ke generování spontánního záření, šířícího se ve všech směrech s náhodnou fází. Růst proudu zvyšuje rychlost zářivé rekombinace, což vede k růstu hustoty fotonového toku. Generované fotony stimulují další rekombinace. Vzhledem k tomu, že největší počet generovaných fotonů má energii rovnou energii maxima spektrálního rozdělení spontánní emise, nastává pro tuto energii nejvíc vynucených přechodů ve srovnání s jinými oblastmi spektrálního rozdělení. Tato okolnost pak vede k postupnému zužování spektra spontánní emise a výraznému růstu intenzity vyzařování v oblasti maxima spektrálního rozdělení emise. Roste-li intenzita vyzařování nelineárně s růstem buzení, nazýváme tento proces superluminiscence. Fotony generované v procesu superluminiscence se šíří stejně, jako ve spontánním režimu ve všech směrech s náhodnou fází. Přejít k laserovému režimu nastává, když se stimulované zesílení rovná ztrátám a záření se stává koherentním. Koherence dosahujeme použitím optického rezonátoru, který zajistí selektivní zesílení elektromagnetické vlny s určitou frekvencí a definovanou fází, čímž vzniká stojaté vlnění. Stupeň koherence je dán kvalitou rezonátoru. Uzká oblast energie čerpání, při níž dochází k náhlému přechodu z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise, se nazývá práh. U injekčních polovodičových laserů máme co dočinění s prahovou hustotou budícího proudu respektive Prahovým proudem I_p a laserová dioda při něm přechází z režimu nekoherentního zdroje do režimu laseru [4], [5].



Obr. 3.5: Konstrukce Laserové diody

Pro malé proudy má záření spontánní charakter a je lineární funkcí budícího proudu. Po dosažení prahového proudu (laserového generování), prudce narůstá výkon stimulovaného záření a ze zrcadel rezonátorů je emitováno koherentní záření, opět lineárně závislé na velikosti budícího proudu. Zároveň také dochází ke kvalitativní změně tvaru vyzařovací charakteristiky laserové diody, vyjádřené zmenšováním úhlu vyzařování v rovině kolmé a rovnoběžné s rovinou přechodu PN, a rovněž ke zmenšení šířky pásma emitovaného záření.

Velkými výhodami laserových diod jsou velké emitující výkony v řádech desítek mW. U mnohovidových diod se setkáváme s pojmem rozdělovací šum. Tento jev je způsoben náhodným rozdělováním výkonu záření mezi jednotlivé vidy. Dalším problémem je náhodná fluktuace intenzity záření. Současné působení rozdělovacího šumu a chromatické disperze vlákna způsobuje náhodné fluktuace intenzity záření a změny tvaru přenášených impulsů.

DFB je zřejmě nejčastějším používaným typem laserových diod.

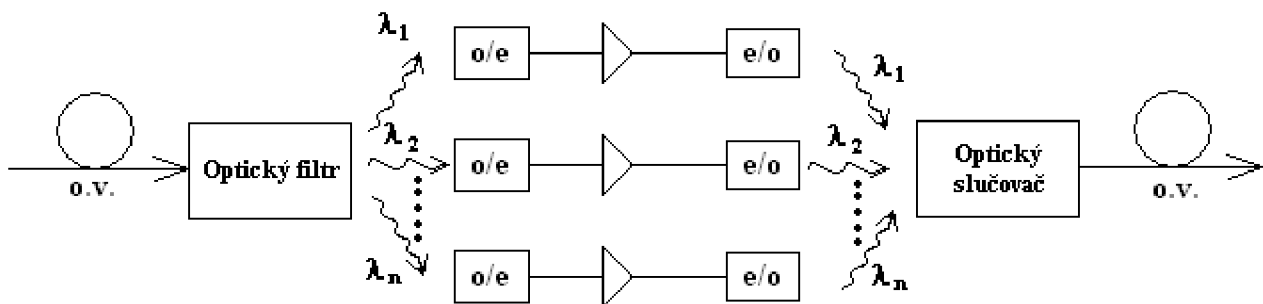
4 Zesilovače v optické trase

Velmi důležitou součástí optické přenosové trasy je optický zesilovač. Zesilovače 1. generace umí pouze zesilovat, kdežto zesilovače 2. generace také obnoví hrany pomocí nelineárního filtru. Díky vlastnostem optického vlákna, mohou být trasy dlouhé až 100 km bez nutnosti zesílení. Na delších trasách se signál zesiluje dvojitým způsobem:

- klasickým elektrickým opakovačem
- optickým zesilovačem.

4.1 Klasický elektrický opakovač

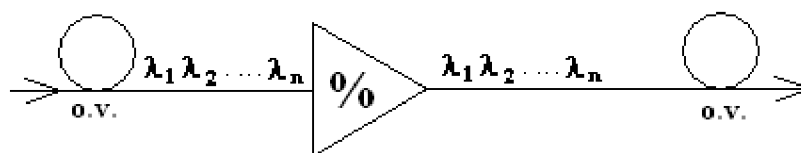
Klasický elektrický opakovač nejprve převede, pomocí převodníku o/e, optický signál na elektrický. Ten je pak operačním zesilovačem zesílen, a následně znovu převeden převodníkem e/o na optický signál. Jeho nevýhoda spočívá v nutnosti převodu optického signálu na elektrický. Tímto převodem však způsobíme bitovou a protokolovou závislost.



Obr. 4.1: Schéma klasického elektrického opakovače

4.2 Optický zesilovač

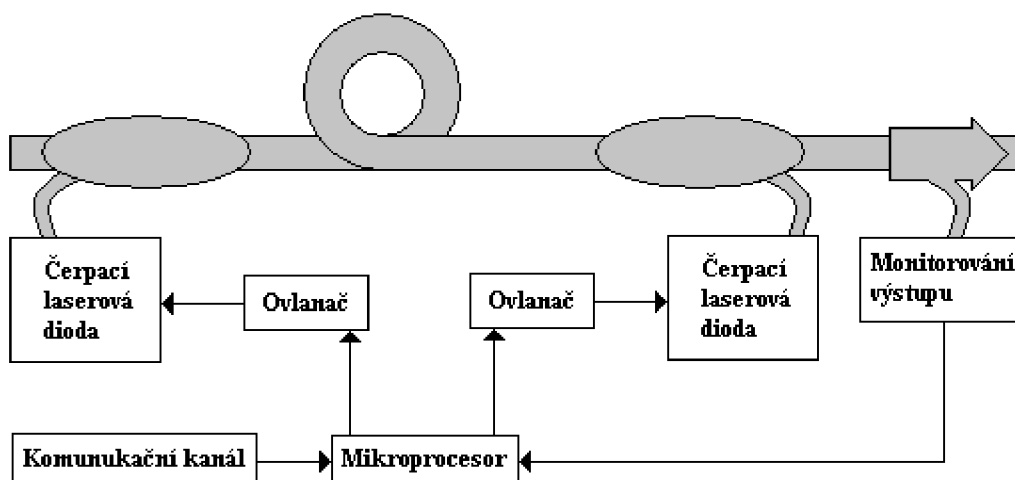
Má jedni zásadní výhodu. Dokáže najednou zesílit všechny procházející optické signály bez nutnosti převodu optického signálu na elektrický a zpět. Tato výhoda nám dále poskytla bitovou a protokolovou nezávislost. Do těchto zesilovačů spadá zesilovač EDFA, který je v dnešní době nevhodnějším a nejpoužívanějším zesilovačem na optické trase. Níže si uvedeme princip jeho funkce.



Obr. 4.2: Schéma optického zesilovače

4.2.1 Zesilovač EDFA

Tento zesilovač je založen na principu laseru. Optický signál je zesílen pomocí stimulované emise záření.



Obr. 4.3: Schéma zesilovače EDFA

Tyto zesilovače se nasazují na optické trasy po 70 – 100 km. EDFA zesiluje signál, který byl utlumen absorbcí a rozptylem ve vlákně. Základními součástmi zesilovače EDFA jsou směrové odbočnice a vlákno EDF. Do optické trasy s užitečným signálem navaříme vláknovou obočnici, na její výstup navaříme vlákno s erbiem (EDF) o určité délce (10-20m), a to navaříme na vstup druhé směrové odbočnice, jejíž výstup je navařen na původní optické vlákno. Na druhé vstupy odbočnic jsou navařeny tzv. čerpací kanály z čerpacích diod. Diody tak dodávají do EDF energii o vlnové délce například 948nm. Ionty erbia tuto energii efektivně přijmou a přejdou do vybuzeného (excitovaného) stavu. Následnou vnitřní relaxací se dostanou na nižší energetické hladiny, odpovídající energiím fotonů o vlnových délkách 1550nm. Ionty erbia pak deexcitují spontánní emisí a dále také stimulovanou emisí, která stimuluje přítomný WDM signál. Parazitní emise je malá a nemá žádný vliv. Věškerá načerpaná energie do erbia, která se neztratila relaxací, se použije na zesílení signálu WDM [2].

Tento zesilovač je velmi dobře použitelný pro zesilování jednoho optického kanálu. Aby však mohl být použit v technologii WDM, musí mít ještě několik vylepšení. Nejdůležitější je, aby zisk zesilovače byl přibližně konstantní na celém spektrálním oboru signálu WDM. Kdyby tomu tak nebylo, na trasách dlouhých v řádu 100km, kdy je zapotřebí několika zesilovačů, by došlo k významnému rozdílu ve spektrálním profilu zisku, což by mohlo zapříčinit příliš malý poměr signálu a šumu některých kanálů. Dalšími požadavky jsou dostatečný zisk při nízkém šumovém čísle, spolehlivost, teplotní stabilita a nízká cena. Tyto požadavky lze vyřešit vhodným řešením, jako je například řešení na obrázku. Čerpání diod je zdvojené, což má za následek dostatečnou spolehlivost. Výstupní výkon zesilovače je monitorován v celé spektrální oblasti, kde se nacházejí přenosové kanály. Měřené hodnoty jsou zpracovávány mikroprocesorem. Ten podle výsledků řídí ovladače čerpacích diod. Touto kontrolou můžeme dosáhnout nezávislosti výstupního výkonu na každém kanále, na spektrální pozici kanálu, na celkovém počtu kanálů i na výstupním výkonu každého kanálu.

5 Detektory optických přijímačů

Nakonec si řekněme něco málo o detektorech optického signálu. Detekce optického signálu nastává po projití signálu demultiplexorem, kdy se přenášený optický signál rozdělí na jednotlivé signály. Dopad optického signálu na detektor a jeho přeměna na signál elektrický, znamená konec optické cesty. Mezi detektory WDM a detektory jednokanálovými je jeden rozdíl, a to takový, že signál vycházející z demultiplexoru WDM má díky optickým zesilovačům nižší poměr signálu a šumu.

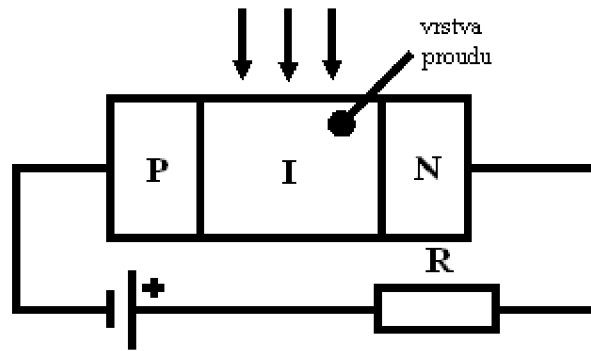
Rozměry fotodiody jsou nepatrné. Mají válcový tvar průměru 3 mm, nebo mají plastové pouzdro, velmi podobné pouzdrům pro tranzistory. Světlo dopadá na místo polovodičového přechodu přes miniaturní optickou čočku, která soustřeďuje paprsky do jednoho bodu. Vývod anody a katody je vhodně rozlišen výrobcem.

K detekci můžeme použít dva druhy fotodiód: - diodu PIN

- lavinovou fotodiodu APD

Křemíkové fotodiody zde nemůžeme použít, kvůli širokému zakázanému pásu křemíku, který je větší než energie fotonu, v oblasti třetího přenosového okna [4], [5].

5.1 Dioda PIN



Obr. 5.1: Struktura fotodiody PIN

Mezi přechod PN je vložena tenká vrstva křemíku - I. Tím se zmenší kapacita přechodu a zvýší se účinnost. Odolnost diody před povrchovým napěťovým průrazem je zvýšena díky Ochrannému prstenci OP. Katoda je tvořena vrstvou N s velmi nerovnoměrnou koncentrací příměsí, která se od povrchu do hloubky prudce zmenšuje. Díky tomu dochází k nerovnoměrnému rozložení intenzity pole, způsobené přiloženým napětím ve zpětném směru. Při osvětlení se uvolní pár elektron-díra. Ty jsou pak urychleny elektrickým polem a způsobují nárazovou ionizaci krystalové mřížky. To má za následek prudký vzrůst anodového proudu při určité velikosti záporného anodového napětí [4], [5].

Předními vlastnostmi PIN diody jsou :

- vyšší přenosová rychlost
- menší šum
- větší citlivost k delším vlnovým délkám
- vhodnost pro optické kabely

5.2 Fotodiody APD

Jsou to sofistikované struktury navržené za účelem zesílení fotoproudu vzniklého detekcí na PN přechodu. Fotony, dopadající na přechod, generují nosiče náboje. Ty jsou urychlovány silným elektrickým polem, které vzniklo ve vyprázdněné oblasti. Tyto nosiče mohou získat postačující množství kinetické energie, která je větší než šířka zakázaného pásma polovodiče. Pak se po srážce s krystalovou mřížkou může excitovat elektron z valenčního pásu do pásu vodivostního, čímž vznikají nové nosiče náboje. Tyto nové náboje opět mají možnost získat velkou kinetickou energii a po srážce s krystalovou mřížkou excitovat další náboje. Tento děj se nazývá Ionizační jev v APD diodě. Tento proces může exponenciálně narůstat a vést k internímu zisku.

APD fotodiody mají větší citlivost (o 5 – 15 dB lepší než PIN diody) , větší dynamický rozsah, naproti tomu složitější výrobu, větší šum způsobený kvantovou podstatou zisku, dále větší závěrná napětí (50 – 400V) , změnu zisku s teplotou a menší šířku pásma než mají fotodiody PIN [4], [5].

6 Praktické ověření vlastností optického přenosu

V laboratoři si můžeme si můžeme ověřit vlastnosti optického přenosu a činnost různých optických zařízení. Můžeme například zkoumat tyto parametry:

- odstup vlnových délek jednotlivých vidů navázaných v jednom optickém vláknu
- porovnání úrovně nezesíleného a zesíleného signálu
- vydělování a vkládání vidu

6.1 Odstup vlnových délek jednotlivých vidů

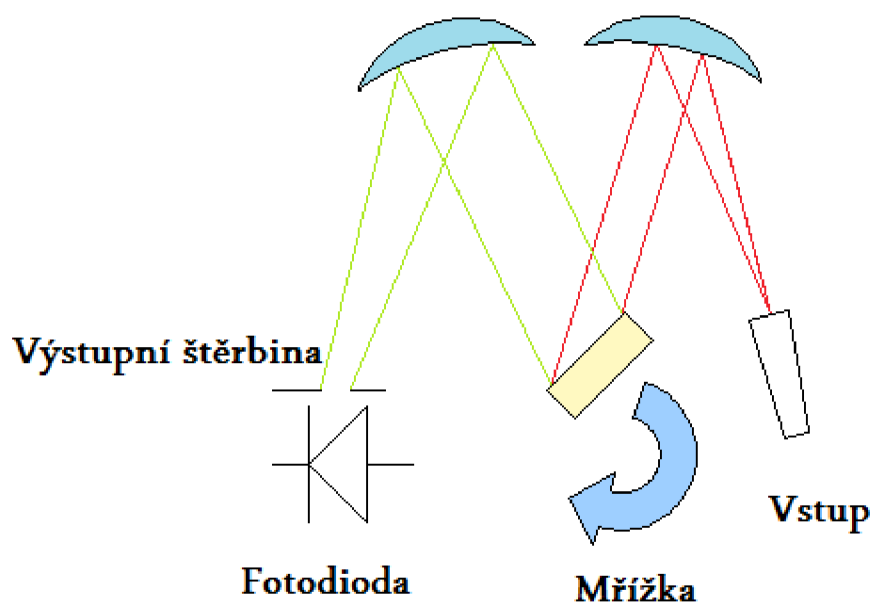
K ověření odstup vlnových délek je zapotřebí zdroje optického záření s například 4-mi DFB lasery o různých vlnových délkách (např. 980 a 1550 nm), coupler 1x4, optický spektrální analyzátor a osciloskop. Dále ještě potřebujeme optické izolátory a optické kabely s konektory.

Zdroj optického záření připojíme na vstupy coupleru 1x4. Ten nám vlnové délky naváže do jednovidového vlákna. To je pak připojeno na vstup optického spektrálního analyzátoru. Můžeme použít například optický spektrální analyzátor série ASO firmy IDIL.



Obr. 6.1: Spektrální analyzátor zapojený na osciloskop

Tento analyzátor je založen na technologii otáčení mřížky. Vstupní signál je pomocí dvou zrcadel a otáčivé mřížky rozložen na jednotlivé vlnové délky. Ty pak dopadají na fotodiodu, která přemění optický signál na elektrický. Výstup analyzátoru je pak připojen na osciloskop. Na osciloskopu pak můžeme vidět průběhy jednotlivých vlnových délek. Pokud chceme tyto průběhy a výsledky měření dále uchovat, můžeme nahradit osciloskop zařízením WaveWATCH od firmy Safibra a dále toto zařízení připojit k počítači. Zařízení WaveWATCH umožňuje zobrazit optické spektrum z optického spektrálního analyzátoru přímo na monitoru počítače. Měřená data jsou zachycena elektronickým zařízením. Data jsou pak zpracována vyhodnocovacím programem. Tento program pak okamžitě zobrazí výsledné spektrum v závislosti na vlnové délce. Nyní bychom tedy měli na osciloskopu, či na monitoru, vidět jednotlivé vlnové délky .

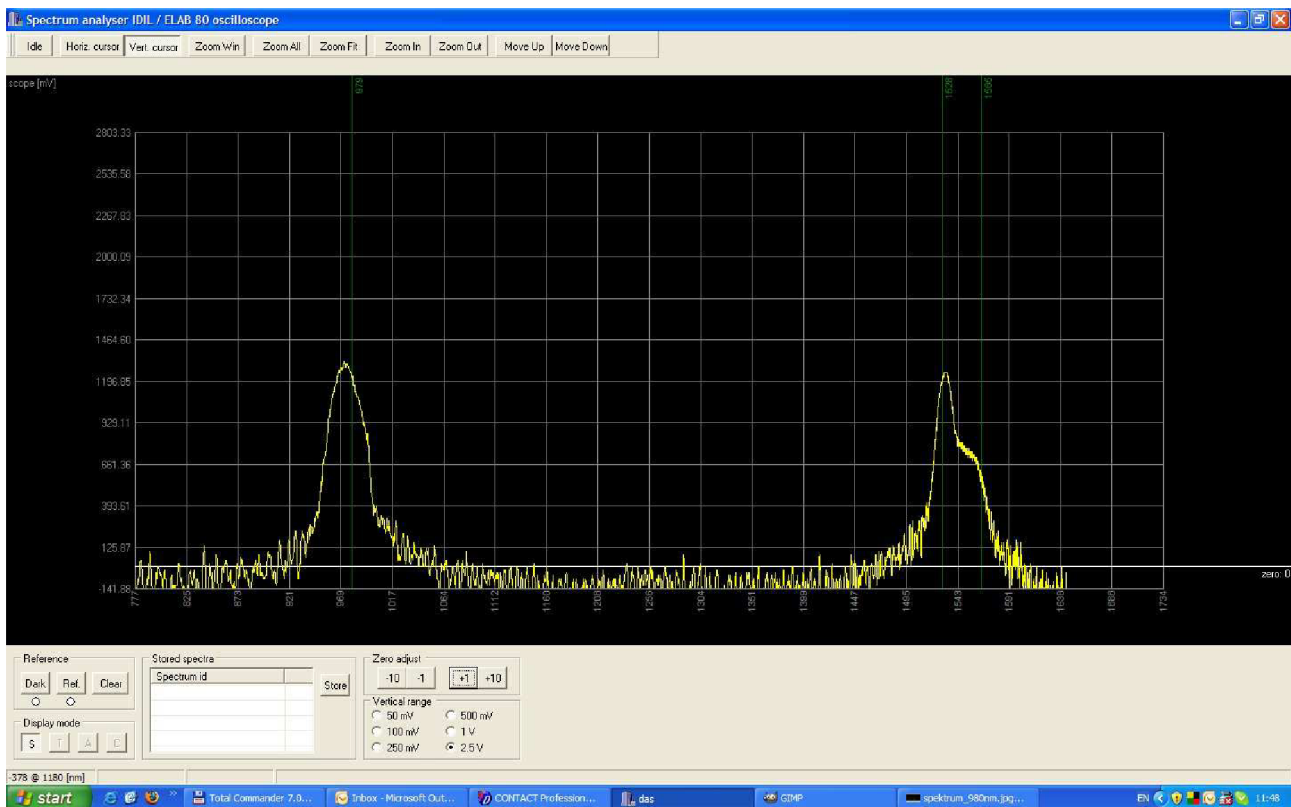


Obr. 6.2: Technologie otáčení mřížky

6.2 Zesílení zesilovačem EDFA

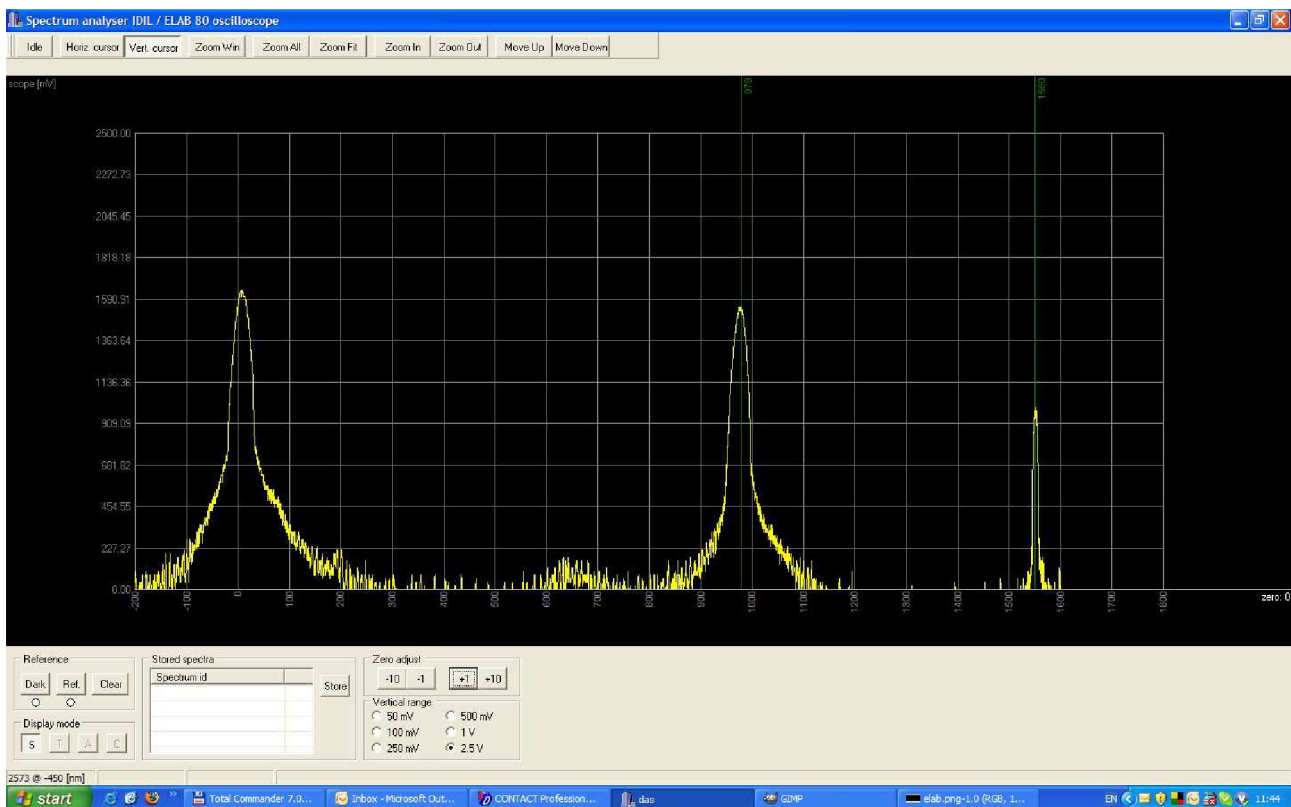
Jako další bod porovnáme úroveň nezesíleného a zesíleného signálu. K tomu budeme potřebovat zdroj optického záření, coupler 1x4, jednovidové optické vlákno, zesilovač EDFA, spektrální analyzátor a osciloskop, či zařízení WaveWATCH a počítač.

Pracoviště zapojíme stejně jako v předchozím případě. Na osciloskopu, či počítači, si zobrazíme vlnové délky a zjistíme špičkovou hodnotu úrovně jednotlivých vlnových délek. Pak do zapojení připojíme zesilovač EDFA a znovu provedeme zobrazení a odečtení úrovně vlnových délek. Už na první pohled by sme měli vidět značný nárůst úrovně signálu.



Obr. 6.3: Nezesílený optický signál

Na obrázku je zobrazen výstup z programu pro zobrazení dat z analyzátoru. Vidíme zde optický vid s vlnovou délkou 980 nm s hodnotou úrovně téměř 1300 mV.

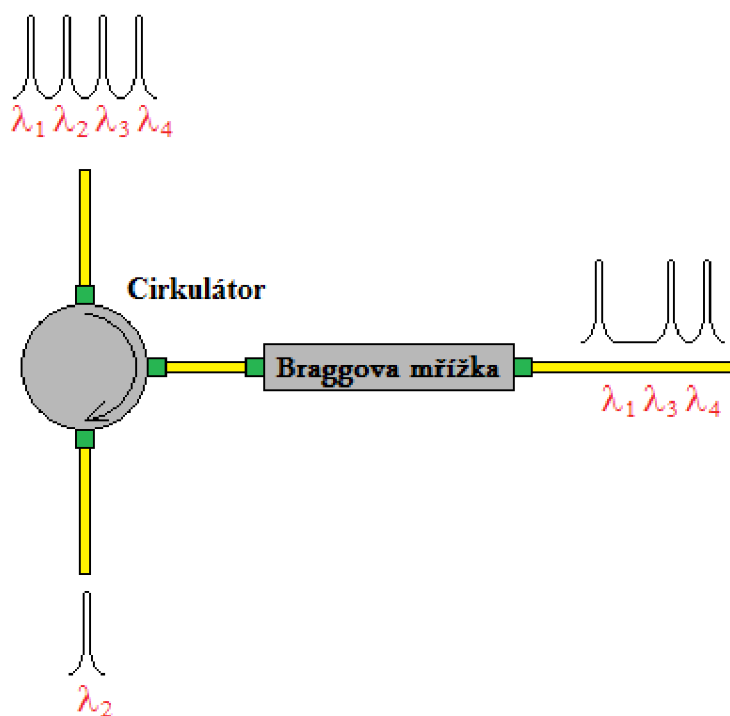


Obr. 6.4 Zesílený optický signál

Na obrázku můžeme spatřit zesílení zesilovače EDFA. Ten zesílil vid 980 nm z úrovně 1300 mV na úroveň téměř 1590 mV. Můžeme také zpozorovat, že kromě přenášeného optického vidu se také zesílil šum.

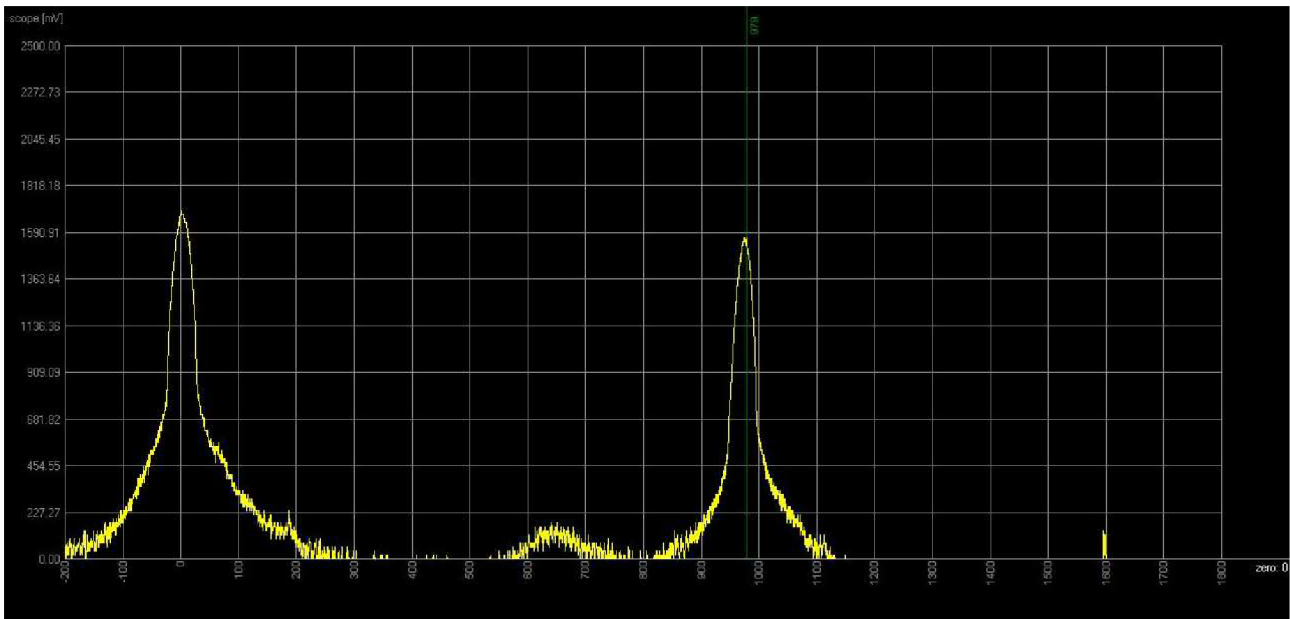
6.3 Vydělování a vkládání vidu

Jako poslední bod, si ověříme funkci cirkulátoru a to schopnost vydělovat a vkládat vlnové délky z a do optického vlákna. Opět budeme pořebovat zdroj optického záření, coupler 1x4, optický cirkulátor, vláknovou Braggovu mřížku, optický kabel, optický spektrální analyzátor a osciloskop, či počítač.



Obr. 6.5: Vydělování optického vidu optickým cirkulátorem

Už víme, jak vypadá spektrum, pokud jsou v kabelu navázány všechny vlnové délky z optického zdroje. Nyní do zapojení zapojíme cirkulátor s Braggovou mřížkou. Tím můžeme z vlákna vydělit vid. Když se znovu podíváme na průběhy na analyzátoru, zjistíme, že vid, který jsme chtěli vydělit, není na analyzátoru zobrazen.



Obr. 6.6: Vydělení optického vidu 1550 nm

Pokud porovnáme obrázek 2 s obrázkem 3, jasně vidíme chybějící optický vid s vlnovou délkou 1550nm.

7 Závěr

Při modernizaci metropolitní sítě, jako je například akademická síť města Brna, chceme dosáhnout rychlejších přenosů dat, větší spolehlivosti a také ekonomické výhodnosti. To nás nutí porovnávat jednotlivé technologie ze všech stran. V denšní době se jako řešení ukazuje nasazení jedné z technologie WDM a to buď DWDM, nebo CWDM.

Než budeme nasazovat zvolenou technologii, musíme také zjistit, jaká je stávající kvalita položeného optického kabelu. Proto musíme před nasazením nových technologií důkladně prozkoumat stav a kvalitu položeného kabelu. Kdybychom totiž použili novou technologii na médium, které by neodpovídalo požadavkům, mohlo by to mít za následek zbytečné vynaložení peněz za technologie, které pak nebudou fungovat tak, jak chceme. Může se také stát, že použitá technologie na těchto vláknech nebude fungovat. Jakmile zjistíme, že vlákna mají správný typ a dobrou kvalitu, můžeme se pustit do volení technologie, kterou budeme nasazovat.

O technologii DWDM víme, že může přenášet informace rychlostmi v řádu stovek Gbit/s na sta-kilometrové vzdálenosti, bez nutnosti zesílení, a jako zdroje záření k tomu potřebují drahé chlazené DFB lasery. V metropolitních sítích takové velké vzdálenosti nemáme, a tudíž bychom se měli poohlédnout po variantě, která má kratší dosah a nebude potřebovat vysoce výkonných a drahých zdrojů záření. Technologii DWDM tedy můžeme použít na trasy, které tvoří celostátní páteřní síť.

Do metropolitní sítě se, díky svým vlastnostem, velmi hodí CWDM technologie. Nepotřebuje více zmíněné drahé lasery, ale stačí klasické nechlazené DFB lasery. Díky přenosu bez zesílení na vzdálenost max. 50-80 kilometrů nepotřebujeme žádné zesilovače, což může být pro finanční rozpočet velkou úlevou. Přestože má CWDM značně menší počet kanálů, je podstatně levnější, než kdybychom nasadili technologii DWDM a využívali stejný počet kanálů jako CWDM.

V praktické části jsme měli možnost seznámit se se součástmi optického vedení. Zobrazili jsme si jednotlivé vidy navázané v jednovidovém optickém vláknu, zobrazili jsme zesílení zesilovače EDFA, které nám zesílilo signál o téměř 300 mV, a nakonec jsme úspěšně vydělili jeden optický vid z přenášeného svazku vidů, konkrétně vid s vlnovou délkou 1550 nm. V průběhu vypracování nebylo zařízení potřebné k měření zakoupeno, tudíž veškeré poznatky jsou pouze teoretické a prezentovaná data jsou výstupem prezentace firmy Safibra.

Jako příloha je přiložen návrh laboratorní úlohy s měřením optického výkonu po projití zesilovačem EDFA. V této úloze se studenti mohou seznámit se zesilovačem EDFA firmi Optocon a dále mohou prozkoumat jeho vlastnosti a vnitřní nastavení. Po seznámení budou měnit nastavení jednotlivých módů zesilovače a měřit výstupní optický výkon.

Literatura:

- [1] GIRARD, A. Guide to WDM Technology. EXFO, Quebec, 2002
- [2] PETERKA, Jiří. Optická revoluce. *IT-NET* [online]. 2000 [cit. 2007-11-20]
- [3] SÝKORA, Jiří. *Princip WDM* [online]. 28. 07. 2004 [cit. 2007-10-15]. Dostupný z WWW:
<<http://access.feld.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cisloclanku=2004072805>>.
- [4] Laserové diody. *Světlo* [online]. 2002 [cit. 2007-11-05].
- [5] *Laserové diody 2* [online]. 21.11.2001 [cit. 2007-10-26]. Dostupný z WWW:
<<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>>
- [6] *DWDM pro metropolitní sítě* [online]. c2005 [cit. 2007-11-10]. Dostupný z WWW:
<http://www.rlc.cz/publikujeme/dwdm_metro/>
- [7] *Albit technologies* [online]. duben 2002 [cit. 2007-11-10]. Dostupný z WWW:
<www.albit.cz/file.php?476>
- [8] *Photonic devices* [online]. c1994-1999 [cit. 2007-11-15]. Dostupný z WWW:
<<http://www.oftc.usyd.edu.au/edweb/devices/index.html>>
- [9] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody : Část 1 - Princip funkce laserových diod. *Elektrorevue* [online]. 2001, roč. 2001, č. 34 [cit. 2007-11-04]. Dostupný z WWW:
<<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>>.
- [10] KYSELÁK, Martin. Optimalizace vysokorychlostních optických přenosových tras. *Elektrorevue* [online]. 2006, roč. 2006, č. 9 [cit. 2007-11-25].
- [11] HOLUB, Petr/. Lambda služby. *ÚVTMU zpravodaj* [online]. 2004, roč. XV, č. 2 [cit. 2007-11-23].
- [12] PRAVDA, Ivan. *Optické přenosové prostředky a systémy WDM*. [s.l.], [2004?]. 28 s. Skripta.
- [13] *Technologie multiplexu WDM* [online]. 2005 [cit. 2007-11-06]. Dostupný z WWW:
<http://www.rlc.cz/publikujeme/technologie_wdm/>.