

# OPTIČKA POJAČALA S ERBIJEM DOPIRANIM SVJETLOVODOM

## OPTICAL AMPLIFIERS WITH ERBIUM DOPED FIBER

Purković, D.<sup>1</sup>, Vrhovski Z.<sup>1</sup>, Petrović I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Visoka tehnička škola u Bjelovaru, Bjelovar, Hrvatska

**Sažetak:** U radu su prikazana osnovna ograničenja optičkih veza. Analizira se gušenje i disperzija signala koji propagira duž svjetlovoda. Dana su neka osnovna obilježja optičkih pojačala. Detaljno su prikazana svojstva optičkog pojačala s erbijem dopiranim svjetlovodom (EDFA), kao jedne od najvažnijih skupina optičkih pojačala i temelj regeneracije signala u optičkoj domeni. Na kraju će se prikazati i usporediti karakteristike šuma EDFA, te izmjerena pojačanja za pojedine snaga pumpanja, kao i pojačanje u višekanalnim sustavima.

**Ključne riječi:** Pojačanje, apsorpcija, EDFA, faktor šuma

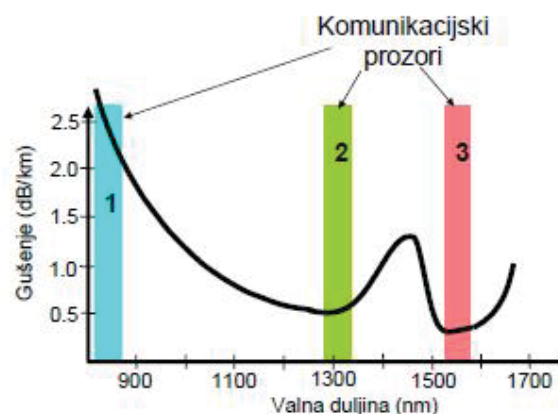
**Abstract:** The purpose of this paper is to show basic limitations of optical connections. It analyzes the attenuation and dispersion of the signal that propagates along the optical fiber. It gives some fundamental characteristics of optical amplifiers. The properties of optical amplifiers with erbium doped fiber (EDFA) are shown in detail, as one of the most important group of optical amplifiers and signal regeneration foundation in the optical domain. At the end, the measurement results for noise characteristics of EDFA and gain for different pump powers and amplification in multichannel systems are shown and compared.

**Key words:** gain, absorption, EDFA, noise factor

### 1. UVOD

Iako su se optička pojačala s dopiranim svjetlovodom počela proučavati još 1964. godine, zapravo su se počela koristiti 25 godina kasnije kada su usavršene tehnike proizvodnje. Prednost optičkih pojačala nad klasičnim elektroničkim regeneriranim signalima je u tome što ne zahtijevaju pretvorbu signala iz optičke u električnu domenu, već signal izravno pojačavaju u optičkoj domeni. Karakteristike pojačala (valna duljina na kojoj pojačalo radi i širina pojasa pojačanja) određeni su dodanim primjesama umjesto samim optičkim vlaknom. Mnogi kemijski elementi kao što su erbij, holmij, neodimij, samarij mogu se koristiti za realizaciju optičkih pojačala. Svi oni rade na valnim duljinama između 0.5-3.5  $\mu\text{m}$ . Erbijem dopirana svjetlovodna pojačala (EDFA) su privukla najviše pozornosti jer osim što omogućavaju

izravno pojačanje optičkog signala, tj. nema potrebe da se optički signal prvo pretvori u električni, ona rade u području valnih duljina od približno 1.55  $\mu\text{m}$ . Područje odgovara 3. komunikacijskom prozoru u kojem je gušenje signala najmanje i iznosi  $\alpha \approx 0.2$  dB/km, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Komunikacijski prozori [4]

### 2. OGRANIČENJA OPTIČKIH VEZA

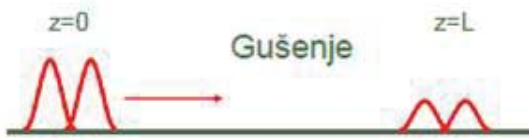
Gušenje i disperzija su dva glavna razloga ograničenja na maksimalnu duljinu optičke veze i na brzinu prijenosa.

#### 2.1. Gušenje

Gušenje unutar svjetlovoda može se opisati diferencijalnom jednačinom (uobičajno za prijenosne linije s gubicima):

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha z \quad (1)$$

gdje je  $P$  snaga optičkog signala u svjetlovodu,  $\alpha$  koeficijent gušenja, a  $z$  je prijedeni put signala (slika 2.). Koeficijent gušenja ne uključuje samo materijalnu apsorpciju (uslijed nesavršenosti dielektrika) nego i ostale izvore gušenja kao što su npr. raspršenje, gušenje zbog prisustva primjesa, gušenje zbog nesavršenosti svjetlovodne strukture i sl.



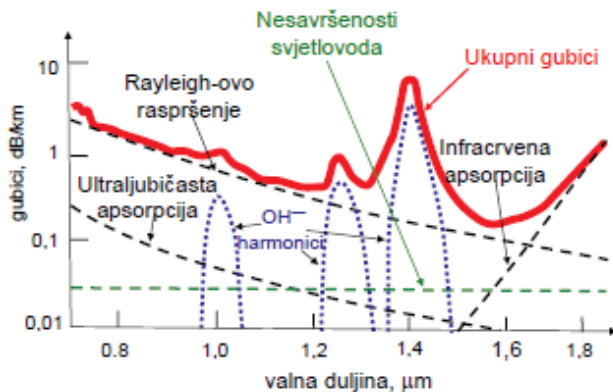
Slika 2. Prikaz gušenja signala [4]

Uobičajeno se  $\alpha$  izražava u dB/km:

$$\alpha \left[ \frac{dB}{km} \right] = -\frac{10}{L} \log \left( \frac{P_{izl}}{P_{ul}} \right) = 4.343\alpha \quad (2)$$

Razni mehanizmi utječu na gušenje u svjetlovodu, a neki od njih su apsorpcija, raspršenje elektromagnetskog vala, infracrvena apsorpcija, ultraljubičasta apsorpcija, Rayleighovo raspršenje te tehnološka gušenja, koja su izravno vezana uz tehnološke postupke pri proizvodnji svjetlovoda i moguće ih je smanjiti poboljšanjem postupka proizvodnje. Također do gušenja može doći zbog savijanja svjetlovoda. Prilikom savijanja može se dogoditi da nisu ispunjeni uvjeti totalne unutarnje refleksije na vanjskom obodu jezgre i tada dio zrake izlazi iz jezgre te vlakno zrači u okolinu i val u vlaknu može jako oslabiti.

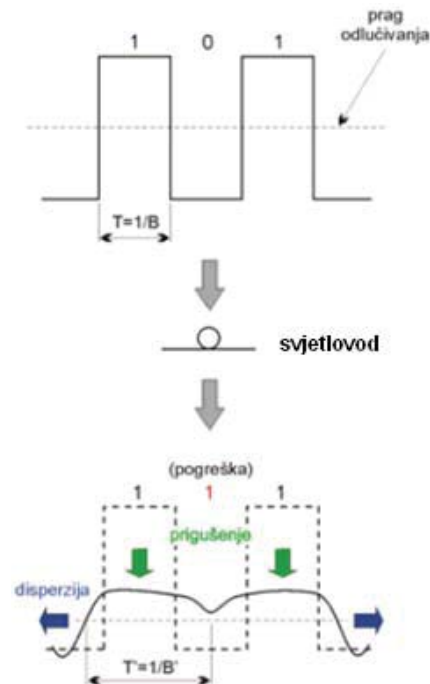
U tehnološka gušenja ubraja se i samo gušenje spoja, bilo da je varení spoj ili spoj ostvaren pomoću konektora. Varení spojevi imaju malo gušenje ( $< 0.05$  dB). Spoj pomoću konektora koristi se na mjestima gdje se očekuju prespajanja (uređaji, rasklopni ormari) i gušenje takvog spoja ovisi o vrsti konektora ( $< 0.3$  dB). Na slici 3 prikazani su uzroci gušenja u svjetlovodu.



Slika 3. Uzroci gušenja u svjetlovodu [4]

## 2.2. Disperzija

Disperzija je uz gušenje jedno od osnovnih ograničenja svjetlovoda. Očituje se kao proširenje i slabljenje signala. Prolaskom signala kroz svjetlovod dolazi do njegovog slabljenja i proširenja koje na prijamoj strani rezultira pogrešnim očitanjem stvarnog poslanog slijeda bitova (slika 4.).



Slika 4. Učinci disperzije [4]

Osnovni uzroci disperzije poredani po iznosu proširenja signala  $\Delta T$ :

- međumodalna disperzija
- kromatska disperzija
- polarizacijska disperzija

Disperzija također postavlja ograničenja na brzinu prijenosa i maksimalnu duljinu optičke veze.

$$\Delta T \leq \frac{T_0}{2}, \text{ odnosno } B_0 \leq \frac{1}{2\Delta T}, \quad (3)$$

gdje je  $\Delta T$  proširenje signala,  $T_0$  širina impulsa, a  $B_0$  je brzina prijenosa.)

Međumodalna disperzija se još naziva i disperzija višestrukog puta, a očituje se pri prolazu zraka kroz svjetlovod pod različitim kutovima (npr. jedna zraka putuje aksijalno, a druga pod nekim kutem). Trebat će različito vrijeme da te dvije zrake dođu do prijammnika, pa će i brzina prijenosa ovisiti o razlici vremena putovanja pojedine zrake kroz svjetlovod.

Kromatska disperzija nastaje zbog ovisnosti grupne brzine o valnoj duljini. Kromatska disperzija se dijeli na materijalnu i valovodnu disperziju. Materijalna disperzija nastaje uslijed činjenice da indeks loma ovisi o valnoj duljini ( $n = n(\lambda)$ ). Valovodna disperzija nastaje zbog činjenice da je koeficijent rasprostiranja  $\beta_z$  funkcija valne duljine ( $\beta_z = \beta_z(\lambda)$ ).

Polarizacijska disperzija je najmanja od svih vrsta disperzije i zbog toga se često zanemaruje. Kod sustava s vrlo velikom brzinom prijenosa (10 Gb/s i više) ona postaje jedan od bitnih faktora ograničenja, pogotovo zato što se takvi sustavi projektiraju s malom ukupnom kromatskom disperzijom.

### 3. OPTIČKA POJAČALA

Većina optičkih pojačala pojačava upadnu svjetlost koristeći stimuliranu emisiju, isti princip kao i kod lasera. Doista, optičko pojačalo i nije ništa drugo već laser bez povratne veze, odnosno rezonatora. Najvažniji mu je parametar optičko pojačanje, koje nastaje kad se u pojačalo pumpa, dovodi snaga (bilo optički ili električki) kako bi se postigla inverzija populacije. Optičko pojačanje ne ovisi samo o frekvenciji (ili valnoj duljini) upadnog signala, već i o intenzitetu signala lokalne zrake u bilo kojoj točki pojačala. Tu ovisnost određuje medij unutar pojačala. Ovdje će se govoriti o pojačalu kao sustavu s dvije energetske razine i homogenim medijem. Koeficijent pojačanja takvog sustava se može napisati kao:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + P/P_s}, \quad (4)$$

gdje je  $g_0$  vršna vrijednost pojačanja,  $\omega$  je optička frekvencija upadnog signala,  $\omega_0$  je prijenosna frekvencija, a  $P$  je optička snaga signala koji se pojačava. Snaga zasićenja  $P_s$  ovisi o svojstvima medija u pojačalu. Parametar  $T_2$  u jednadžbi se naziva dipolno vrijeme relaksacije i obično je vrlo maleno ( $< 1$  ps). Vrijeme fluorescencije  $T_1$  o kojem ovisi i snaga  $P_s$  još se naziva i vrijeme relaksacije populacije i varira između 100 ps i 10 ms, ovisno o mediju u pojačalu. Pomoću jednadžbe 4 mogu se odrediti širina pojasa pojačanja, faktor pojačanja i izlazna snaga u zasićenju.

#### 3.1. Spektar pojačanja i širina pojasa

Promotrit će se režim rada u kojem pojačalo nije ušlo u područje zasićenja i za koji vrijedi  $P/P_s \ll 1$  duž pojačala. Zanemarujući izraz  $P/P_s$  u jednadžbi 4, koeficijent pojačanja postaje:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2} \quad (5)$$

Jednadžba 5 pokazuje da se maksimum pojačanja postiže kad se frekvencija upadnog vala podudara s frekvencijom  $\omega_0$ . Smanjenje pojačanja za  $\omega \neq \omega_0$  ravna se prema Lorentzovoj distribuciji koja je karakteristična za homogene sustave [1]. Širina pojasa pojačanja je definirana kao puna širina na polovici najveće vrijednosti spektra pojačanja  $g(\omega)$ . Za Lorentzov oblik spektralne linije širina pojasa je dana kao  $\Delta\omega_g = 2/T_2$ , odnosno kao:

$$\Delta\nu_g = \frac{\Delta\omega_g}{2\pi} = \frac{1}{\pi T_2} \quad (6)$$

Npr.,  $\Delta\nu_g \approx 5$  THz za poluvodička optička pojačala za koja je  $T_2 \approx 60$  fs.

Pojačala s relativno velikom širinom pojasa se koriste u komunikacijskim sustavima jer je kod njih pojačanje približno jednako duž cijelog pojasa, čak i za višekanalne signale.

### 3.2. Šum pojačala

Sva pojačala pojačani signal degradiraju na vrijednost SNR (signal to noise ratio) zbog utjecaja spontane emisije koja tijekom pojačanja dodaje šum signalu. Odnos signal/šum (SNR) se izražava preko parametra  $F_n$ , koji se naziva faktor šuma pojačala, analogija s električkim pojačalima.

$$F_n = \frac{(SNR)_{ul}}{(SNR)_{izl}}, \quad (7)$$

gdje se SNR odnosi na električnu snagu dobivenu kad je optički signal pretvoren u električnu struju.

$$(SNR)_{ul} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_s^2} = \frac{(RP_{ul})^2}{2q(RP_{ul})\Delta f} = \frac{P_{ul}}{2h\nu\Delta f} \quad (8)$$

$$(SNR)_{izl} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma^2} = \frac{(RGP_{ul})^2}{\sigma^2} \approx \frac{GP_{ul}}{4S_{sp}\Delta f} \quad (9)$$

Iz ovih jednadžbi slijedi:

$$F_n = 2n_{sp}(G - 1)/G \approx 2n_{sp}, \quad (10)$$

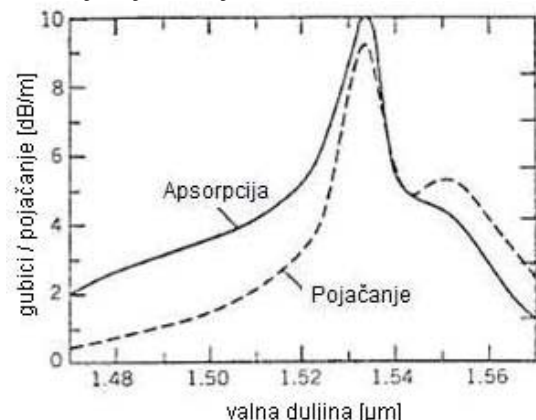
gdje je  $n_{sp}$  faktor spontane emisije i definira se kao:

$$n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1), \quad (11)$$

gdje su  $N_2$  i  $N_1$  gustoće stanja na pobuđenoj, odnosno osnovnoj energetskej razini. Jednadžba 10 pokazuje jedno vrlo važno svojstvo optičkih pojačala, a to je da se SNR vrijednost pojačanog signala smanjuje za 3 dB, čak i za idealno pojačalo za koje je  $n_{sp} = 1$ . Za većinu praktičnih pojačala  $F_n$  može premašiti vrijednost 3dB i može iznositi od 6 do 8 dB [1]. Naravno, pri korištenju u optičkim komunikacijskim sustavima optička pojačala trebaju imati što manji  $F_n$ .

### 4. SVOJSTVA EDFA

EDFA se koristi u C i L frekvencijskim pojasevima, tj. na valnim duljinama od 1530-do 1565 nm, odnosno 1565-1625 nm. Dijagram ovisnosti apsorpcije i pojačanja o valnoj duljini dan je na slici 5.

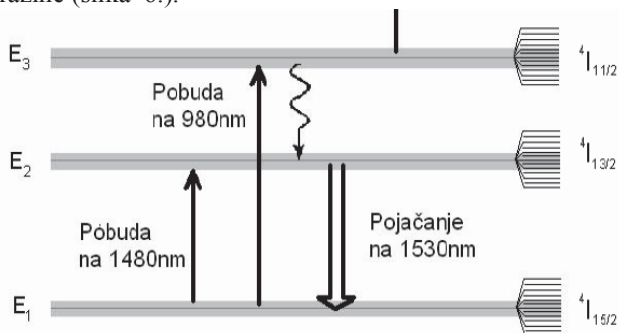


Slika 5. Ovisnost apsorpcije i pojačanja o valnoj duljini [4]

Bitan je odnos apsorpcije i pojačanja za pojedine valne duljine i vidljivo je kako je taj odnos optimalan upravo za područje valnih duljina oko 1,55  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1. Zahtjevi na snagu pumpanja

Optimalna vrijednost dužine pojačala ovisi o snazi pumpanja, odnosno snazi koju je potrebno dovesti u sustav kako bi se atomi erbija pobudili na više energetske razine (slika 6.).



Slika 6. Izgled energetske razine erbija [4]

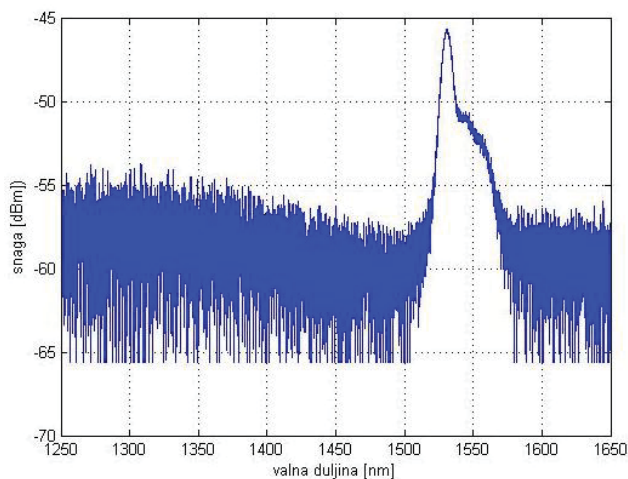
Pumpanje je moguće na dvije valne duljine, 980 nm i 1480 nm. U praksi, za pumpanje se koristi CW poluvodički laser, ali je signal u obliku niza impulsa (sadrži slučajne sekvence 1 i 0), a duljina trajanja pojedinog impulsa je obrnuto proporcionalna s brzinom prijenosa (bit rate). Kod EDFA pojačanje je konstantno tijekom vremena, pa čak i za impulse duljine 1  $\mu\text{s}$ . To se događa zbog relativno velikog vremena fluorescencije povezanog s vremenom tijekom kojeg ioni erbija ostaju pobuđeni ( $T_1 \sim 10$  ms). Kad su promjene signala puno kraće od vremena  $T_1$ , ioni erbija ne mogu pratiti tako brze promjene. Kako su energije pojedinih impulsa tipično puno manje od energije zasićenja ( $\sim 10$   $\mu\text{J}$ ), EDFA ima odziv na prosječnu vrijednost snage. Kao rezultat, pojačanje u zasićenju se ravna prema srednjoj snazi signala i pojačanje pojačala ne varira od impulsa do impulsa, čak ni za WDM signal.

#### 4.2. Šum EDFA pojačala

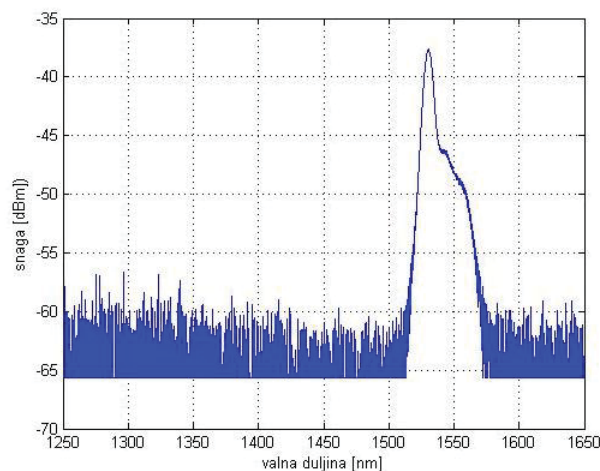
Faktor šuma  $F_n$ ,  $F_n = 2n_{sp}$  (jednadžba 3.1.9) osnovni je ograničavajući faktor pri izvedbi sustava i veličina. Faktor spontane emisije  $n_{sp}$  ovisi o relativnim populacijama  $N_1$  i  $N_2$  u osnovnim razinama i pobuđenim stanjima, i to kao  $n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1)$ . (jednadžba 3.1.10). Kako je rad EDFA baziran na energetskom dijagramu s tri razine,  $N_1 \neq 0$  i  $n_{sp} > 1$  očekuje se da je faktor šuma EDFA veći od idealne vrijednosti (3 dB). U obzir treba uzeti da se  $N_1$  i  $N_2$  mijenjaju duž svjetlovoda zbog njihove ovisnosti o snazi pumpanja i snazi signala; zbog toga  $n_{sp}$  treba usrednjiti duž pojačala. Kao rezultat dobije se faktor šuma ovisan i o dužini pojačala  $L$  i o snazi pumpanja  $P_p$ , te o pojačanju. Općenito, teško je istovremeno postići veliko pojačanje, nizak šum i visoku učinkovitost pumpanja. Jedno od ograničenja je i reflektirani signal koji putuje od kraja prema pumpi i utječe na snagu pumpanja. Ugradnja unutarnjeg izolatora ublažava ovaj problem. Relativno niska razina šuma EDFA čini ih idealnim izborom za realizaciju WDM

sustava (optički komunikacijski sustavi s multipleksiranjem po valnim duljinama).

Unatoč niskom šumu performanse optičkih sustava s velikim dužinama svjetlovoda, kada je potrebno koristiti višestruka EDFA, često su ograničene šumom pojačala. Šum pojačala također unosi vremensko podrhtavanje signala (*timing jitter*). Na sljedećim slikama prikazane su karakteristike šuma EDFA, za pumpanje na 980 nm uz snage pumpanja od 20 mW i 60 mW (slike 7. i 8.).

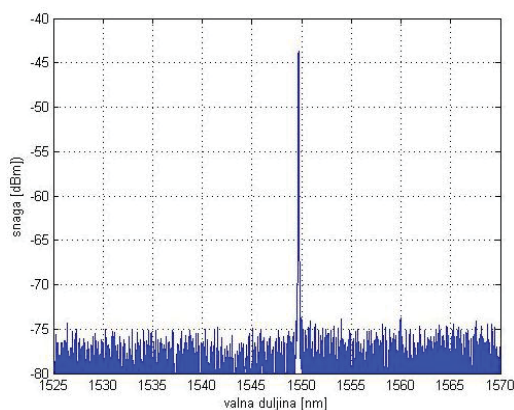


Slika 7. Šum EDFA uz snagu pumpanja 20mW

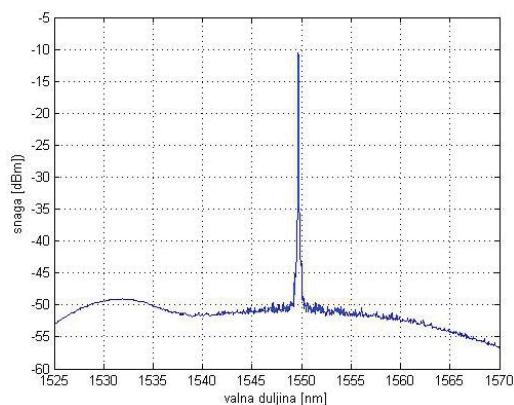


Slika 8. Šum EDFA uz snagu pumpanja 60mW

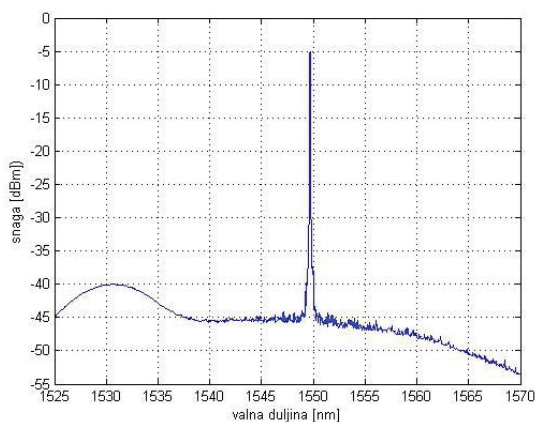
Osim karakteristike šuma, također su snimljene karakteristike pojačanja EDFA. Prvo je snimljen sam signal, generiran iz lasera valne duljine 1550 nm (slika 4.7.), a potom se u krug uključila i poluvodička laserska dioda koju smo koristili za pumpanje na valnoj duljini od 980 nm i to za različite snage pumpanja: 20 mW (uz gušenje na atenuatoru -10 dBm), 60 mW i 100 mW (uz gušenje na atenuatoru -20 dBm).



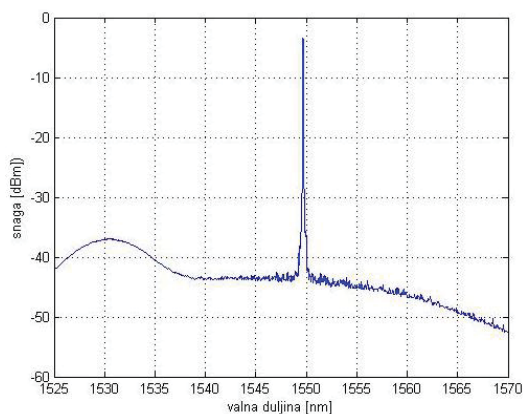
Slika 9. Signal na 1550 nm



Slika 10. Signal na 1550 nm uz snagu pumpanja 20mW



Slika 11. Signal na 1550 nm uz snagu pumpanja 60mW



Slika 12. Signal na 1550 nm uz snagu pumpanja 100mW

Na prethodnim slikama je vidljivo kako se povećanjem snage pumpanja dolazi u područje zasićenja. Tako već za snagu pumpanja veću od 60 mW imamo malu promjenu pojačanja signala s promjenom snage pumpanja, što se dobro vidi na slici 4.9., kod snage pumpanja 100 mW.

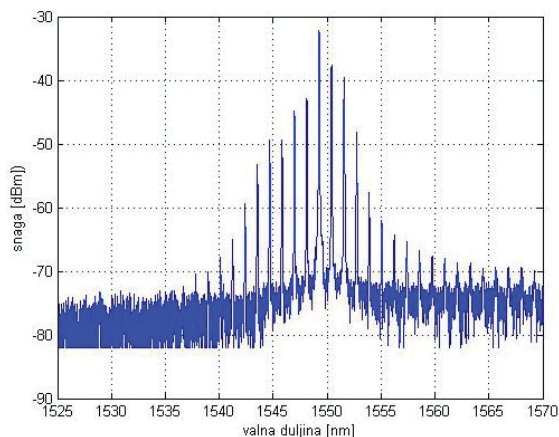
### 4.3. Višekanalno pojačavanje

Širina pojasa EDFA je dovoljno velika da se mogu koristiti u WDM sustavima. Ostvareno pojačanje je polarizacijski neosjetljivo. Također, međukanalno preslušavanje zbog modulacije gustoće nosioca, koje se javlja kod poluvodičkih optičkih pojačala (SOA), kod EDFA se ne javlja. Razlog je relativno velika vrijednost života nosioca (oko 10 ms), dok je to vrijeme kod SOA <1 ns. Spor odziv EDFA uzrok je nemogućnosti modulacije pojačanja na frekvencijama većim od 10 kHz. Drugi uzrok međukanalnog preslušavanja je odlazak pojačala u zasićenje zbog međukanalnih smetnji. Do njega dolazi zbog toga jer pojačanje pojedinog kanala ulazi u zasićenje, što zbog svoje vlastite snage (samozasićenje), i zbog snage signala susjednih kanala. Ovakva vrsta preslušavanja je prisutna u svim optičkim pojačalima, uključujući i EDFA. Može se izbjeći radom pojačala izvan područja zasićenja.

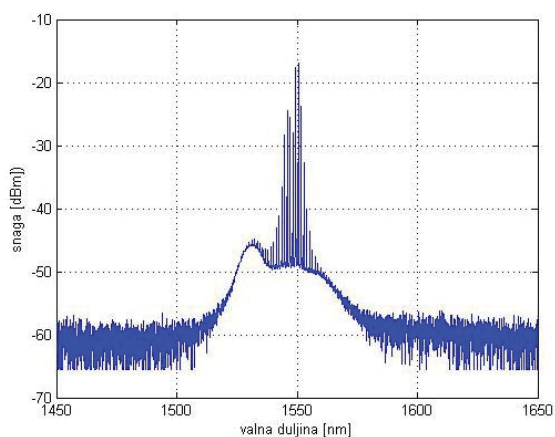
Glavno praktično ograničenje EDFA je nepostojanje spektralne uniformnosti pojačanja pojačala. Iako je spektar pojačanja EDFA relativno širok, što je vidljivo na slici 4.1., pojačanje je daleko od uniformnog, odnosno ravnog duž širokog raspona valnih duljina. Kao rezultat, različiti kanali WDM signala se različito pojačavaju. Ovaj problem naročito dolazi do izražaja u komunikacijskim sustavima za veće udaljenosti kod kojih imamo kaskade EDFA. Razlog je u tome što male oscilacije u pojačanju za pojedine kanale rastu eksponencijalno kroz kaskadu ulaznih pojačala, ako je spektar pojačanja jednak za sva pojačala u kaskadi. Čak i razlike od samo 0.2 dB mogu narasti do 20 dB za kaskadu od 100 pojačala, uzrokujući promjene snage signala s faktorom 100, što je u praksi

neprihvatljivo. Za približno jednako pojačanje svih kanala potrebno je sve kanale skupiti oko jednog od vrhova u spektru pojačanja EDFA. U jednostavnijem pristupu, ulazne snage različitih kanala se podešavaju tako da se smanje promjene snage na prijammiku na neku prihvatljivu razinu. Ovakav način je prihvatljiv za sustave s manjim brojem kanala, dok je neprikladan za WDM sustave s velikim brojem kanala. Čitava širina pojasa od 35 do 40 nm se može koristiti ako se uspije postići ravna karakteristika pojačanja. To se postiže korištenjem optičkog filtra čiji transmisijski gubici približno odgovaraju karakteristikama pojačanja (veliki u području velikog pojačanja, a mali u području niskog pojačanja) i koji se umeće nakon dopiranog dijela svjetlovoda. Korištenjem optičkog filtra izlazna snaga će postati konstantna za sve kanale. Mjesto na koje se umeće filter je također vrlo bitno. Ako se filter umetne prije pojačala, povećat će se šum, a stavljajući ga iza pojačala smanjit će se izlazna snaga.

Na slici 13. prikazan je višekanalni signal dobiven iz Fabry-Perot lasera, koji ima više rezonantnih modova, a koji su u našem slučaju predstavljali više kanala.

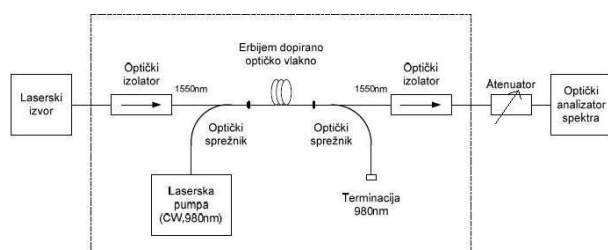


Slika 13. Višekanalni signal



Slika 14. Višekanalni signal uz snagu pumpanja 20mW

Vidljivo je da se EDFA koristi u dijelu karakteristike u kojem ima relativno konstantno pojačanje na koju je superponiran višekanalni signal. Slika 4.12. ne pokazuje stvarnu vrijednost pojačanja EDFA. Tijekom mjerenja (prema slici 4.13.) signal iz lasera je bio prigušen 15 dBm, a samo gušenje sustava u kojem se nalazilo EDFA je iznosilo oko 13 dBm, dok je na promjenjivom atenuatoru bilo postavljeno gušenje od 5 dBm. Stvarno pojačanje EDFA bismo dobili kad bi mjerili signal na izlazu bez prisustva EDFA u krugu, a potom ponovno s EDFA prisutnim u krugu.



Slika 15. Shema sustava za mjerenje karakteristika EDFA

## 5. ZAKLJUČAK

Erbijem dopirano svjetlovodno pojačalo (EDFA) je pojačalo koje omogućava direktno pojačanje optičkog signala, tj. nema potrebe da se optički signal prvo pretvori u električni. Time se pojednostavljuje izvedba komunikacijskog sustava, a postiže se i velika ušteda.

EDFA se koristi u C i L frekvencijskim pojasevima, tj. na valnim duljinama od 1530 do 1565 nm, odnosno 1565-1625 nm.

Širina pojasa EDFA je dovoljno velika da se mogu koristiti u WDM sustavima. Glavno praktično ograničenje EDFA je nepostojanje spektralne uniformnosti pojačanja pojačala. Iako je spektar pojačanja EDFA relativno širok, pojačanje je daleko od uniformnog, odnosno ravnog duž širokog raspona valnih duljina. Rezultat je taj da se različiti kanali WDM signala različito pojačavaju. Ovaj problem naročito dolazi do izražaja u komunikacijskim sustavima na veće udaljenosti, kod kojih imamo kaskade EDFA. Osnovne prednosti primjene EDFA su kompenziranje prigušenja optičkog vlakna, veliki frekvencijski pojas (~30 nm) i mogućnost istovremenog pojačavanja više kanala. To je pridonijelo naglom razvoju WDM sustava i optičkih komunikacija u cjelini.

## 6. LITERATURA

- [1] Govind P. Agrawal, Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [2] T. G. Hodgkinson, R. A. Harmon, and D. W. Smith, Electron. Lett. 23, 513 (2009).
- [3] M. Bass, E. W. Van Stryland, Optical Society of America, McGraw-Hill Prof Med/Tech, 2002.
- [4] Predavanja iz predmeta Tehnologija optičkih komunikacija, Z.Šipuš, M. Bosiljevac, T. Komljenović, FER.

### Kontakt:

Dalibor Purković, mag.ing.eit.  
Visoka tehnička škola u Bjelovaru  
Trg Eugena Kvaternika 4,  
43000 Bjelovar  
tel. 043/241-185  
mail: [dpurkovic@vtsbj.hr](mailto:dpurkovic@vtsbj.hr)