

OPTIMIZING THE PARAMETERS OF AMPLIFIERS USED IN THE OPTICAL CHANNEL OF CATV SYSTEMS

ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА УСИЛВАТЕЛИ, ИЗПОЛЗВАНИ В ОПТИЧНИЯ КАНАЛ НА CATV СИСТЕМИ

Lidia T. Jordanova, Valentin I. Topchiev

Faculty of Telecommunications at the Technical University of Sofia,
Kl. Ochridski 8, 1000 Sofia, Bulgaria, e-mail: jordanova@tu-sofia.bg, vtsc@mail.bg

Лидия Т. Йорданова, Валентин И. Топчиев

Факултет по телекомуникации на Технически университет - София,
Кл. Охридски 8, 1000 София, България, e-mail: jordanova@tu-sofia.bg, vtsc@mail.bg

Keywords: EDFA, forward pumping, Gain, Noise figure, ASE power

Abstract – In this paper the results of simulation of erbium-doped fiber amplifier (EDFA) characteristics are presented. The Gain, ASE power and Noise Figure variations of a forward pumped EDFA as functions of fiber length, injected pump power and signal input level are investigated. In this research a simulation program that solves the rate and propagation equations numerically and shows the obtained results graphically is created in MatLab. The typical EDFA physical parameters used in the simulation program for two pump wavelengths (980 и 1480 nm) are given. The optimal length of erbium-doped fiber, the pump power and the signal input power dynamic range that meet the requirements for maximum gain and minimum noise figure are determined.

Резюме – В тази работа са представени резултати от симулационни изследвания на характеристиките на оптични усилватели на базата на легирано с ербий влакно (EDFA). Обекти на изследването са зависимостите на усилването, шумовата мощност от ASE и коефициентът на шум от дължината на легираното влакно, активиращата мощност и нивото на входния сигнал на EDFA с право напомпване. За провеждане на изследването е съставена симулационна програма на Matlab, с помощта на която се решават уравненията на квантовите преходи и на разпространението и получените резултати се представят графично. Дадени са типичните физични параметри на EDFA, които се използват в симулационната програма, за двете дължини на вълната на напомпващия лазер (980 и 1480 nm). Определени са оптималните дължини на легираното влакно, на напомпващите мощности и динамичния обхват на входните сигнали, при които се изпълняват едновременно изискванията за максимално усилване и минимален коефициент на шум.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

За усилване на сигналите, предавани по оптичния канал на CATV системи, са се наложили усилвателите, в които се използва легирано с ербий оптично влакно (EDFA). Причините за това са както ниската им цена и лесна реализация, така и отличните им параметри в С обхвата (1525-1565 nm), а именно голям коефициент на усилване (30-50 dB), широк работен обхват (≈ 90 nm), малък коефициент на шум (3-5 dB) и сравнително високо ниво на изходния сигнал (10-20 dBm).

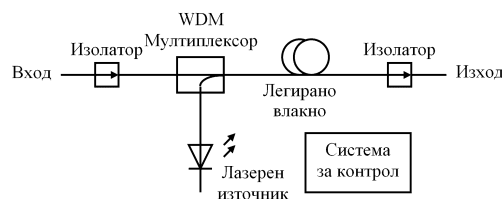
Принципът на действие на EDFA се основава на поглъщане на енергията на светлината, генерирана от напмпващия източник, от легираните във влакното ербиеви атоми и преизлъчването ѝ в обхвата на усилвания сигнал. В EDFA освен стимулирана е налице и спонтанна емисия на фотони, която поражда шум, наречен усилен спонтанна емисия (ASE). Изследванията показват, че най-ефективни са EDFA, в които напмпващият сигнал е с дължина на вълната 980 nm или 1480 nm [1]. Когато напмпващият лазер работи с $\lambda = 980$ nm, се постига по-малък коефициент на шум, а при работата му с $\lambda = 1480$ nm – по-високо ниво на усиления сигнал.

Съществуват три основни схеми за реализиране на EDFA, различаващи се по начина на подаване на напмпващата светлина към влакното [2]. Схемата, в която посоката на сигнала от активирация лазер съвпада с тази на усилвания сигнал (с право напмпване), осигурява по-ниски нива на шум от ASE. За разлика от нея схемата с обратно напмпване позволява да се постигнат по-големи изходни мощности на насищане. Предимствата на двете схеми (малък коефициент на шум и голяма изходна мощност) са обединени в третата схема, която е с двустранното напмпване.

Целта на авторите е да се състави математически модел на EDFA с право напмпване и симулационна програма на Matlab, с помощта на която да се изследват зависимостите на основните му параметри (коефициент на усилване, шумов коефициент, изходна мощност на насищане) от дължината на легираното влакно, напмпващата мощност и нивото на входния сигнал.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА EDFA

На фиг. 1 е показана блоковата схема на EDFA с право напмпване, която съдържа напмпващ лазер, WDM мултиплексор, легирано оптично влакно, изолатори и система за контрол. Обикновено в изхода на EDFA се включва оптичен лентов филтър за потискане на напмпващия сигнал и ограничаване на спектъра на шумовете от ASE.



Фиг. 1 Структурна схема на EDFA

За определяне на основните параметри на усилвателя са използвани уравненията на разпространение, които описват изменението на активиращата (P_p), сигналната (P_s) и шумовата (P_{ASE}) мощности по дължината на влакното. Те се представят по следния начин:

$$\frac{dP_s}{dz} = \Gamma_s (N_2 \sigma_s^e - N_1 \sigma_s^a) P_s, \quad (1)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = \Gamma_p (N_2 \sigma_p^e - N_1 \sigma_p^a) P_p, \quad (2)$$

$$\frac{dP_{ASE}^{\pm}}{dz} = \Gamma(\lambda) \sigma_s^e N_2 P_0 + \Gamma(\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1), \quad (3)$$

където Γ_p и Γ_s са модовите коефициенти на участие в усилването на напмпващата мощност и тази на полезния сигнал (фактори на припокриване), σ^e и σ^a – напречните сечения на преходите при излъчване и при активиране, N_1 и N_2 – броят на ербиевите йони в основно и възбудено състояние, а $P_0 = 2 h\nu\Delta\nu$ е частта от спонтанната емисия, чиято посока съвпада с модата на основния сигнал. Съставките P_{ASE}^+ и P_{ASE}^- отчитат обстоятелството, че продуктите от ASE се разпространяват както по посока, така и противоположно на полезния сигнал. В уравненията на разпространение не е отчетено затихването на сигналите в легираното влакно, тъй като неговата дължина е сравнително малка (около 10-20 m).

Усилването на сигнала в легирано с ербий влакно с дължина L се определя (в dB) от израза

$$G = P_s(L)/P_s(0), \quad (4)$$

където $P_s(0)$ и $P_s(L)$ е входното и изходното ниво на полезния сигнал.

При изследване на шумовите характеристики на EDFA се отчита само съставката на оптичната шумова мощност от ASE, която е съпосочна с полезния сигнал (P_{ASE}^+). Нейната средна стойност се изчислява по формулата

$$P_{ASE} = n_{sp} h\nu (G - 1) \Delta\nu, \quad (5)$$

където $n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1)$ е коефициентът на инверсна населеност, $h\nu$ – енергията на фотона, $\Delta\nu$ – широчината на пропускащата лента на оптичния филтър в изхода на усилвателя.

Като се има предвид, че коефициентът на шум представлява отношение на изходната и входната шумови мощности, за неговото определяне е изведена следният израз:

$$NF = 2n_{sp} \frac{(G-1)}{G} = \frac{2P_{ASE}}{G h\nu \Delta\nu}. \quad (6)$$

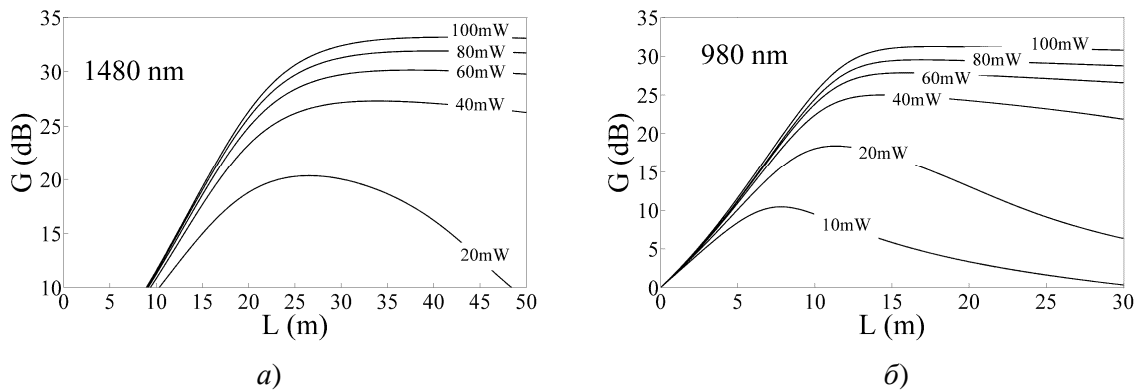
При изследване на характеристиките на EDFA освен дадените тук изрази са използвани и формулите от [2] за определяне на параметрите N_1 и N_2 .

3. ЗАВИСИМОСТИ НА КОЕФИЦИЕНТА НА УСИЛВАНЕ

За провеждане на симулационните изследвания са използвани следните физични параметрите на EDFA: тип на легираното световодно влакно – Al-Ge-Er-SiO₂; концентрация на ербиевите йони (N) – $0,7 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^{-3}$; време на престой на ербиевите йони на енергийно ниво 2 (τ) – 10 ms; радиус на ядрото на легираното влакно – 1,5 μm ; фактори на припокриване: $\Gamma_s = 0,40$ (за 1535 – 1565 nm), $\Gamma_p = 0,43$ (за 1480 nm), $\Gamma_p = 0,64$ (за 980 nm); напречно сечение на прехода при активиране [$\times 10^{-21} \text{ cm}^2$]: $\sigma_s^a = 1,9$ (за 1550 nm), $\sigma_p^a = 2,7$ (за

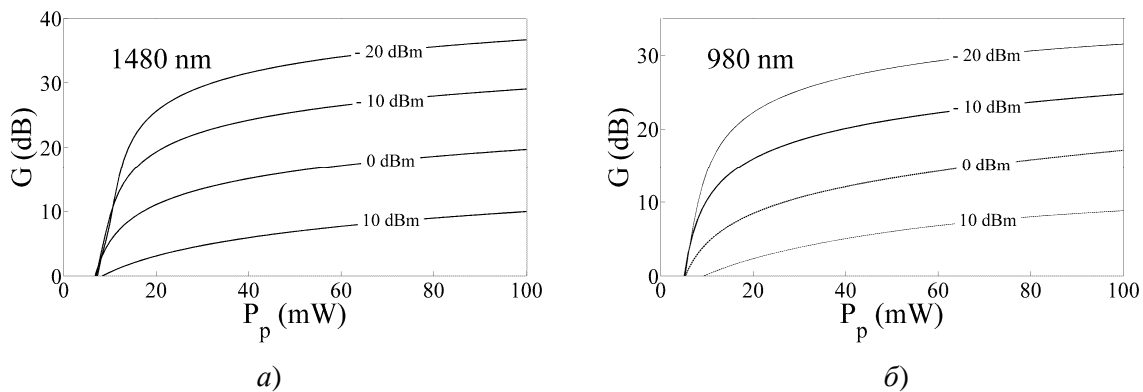
980 nm), $\sigma_p^a = 1,5$ (за 1480 nm); напречно сечение на прехода при излъчване [$\times 10^{-21} \text{ cm}^2$]: $\sigma_s^e = 2,6$ (1550 nm), $\sigma_p^e = 0$ (980 nm); $\sigma_p^e = 0,5$ (1480 nm).

На фиг. 2 са представени зависимостите на коефициента на усилване G от дължината на легираното влакно L за стойности на напмпващата мощност P_p , променящи се от 10 до 100 mW и ниво на входния сигнал – 20 dBm. Както се вижда от графиките, при работа на активирания лазер с $\lambda_p = 980 \text{ nm}$ процес на ефективно усилване е налице в първите 15 m от легираното влакно, докато при $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$ ефективната дължина на влакното нараства до около 35 метра. Получените оптимални стойности за L са използвани в симулационните изследвания по-нататък.



Фиг. 2 Зависимост на G от L при $P_p = \text{const}$ и $\lambda_p = 980 \text{ nm}$ (a) и $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$ (б)

Характерът на изменение на коефициента на усилване при $\lambda_p = 980 \text{ nm}$ се обяснява с голямото напречно сечение на прехода, което е причина за подържането на високо ниво на инверсна населеност и от там процесът на преразпределяне на активиращата мощност завършва сравнително бързо.



Фиг. 3. Зависимости на G от P_p за различни стойности на P_{in}

Когато активиращото излъчване е с $\lambda_p = 1840 \text{ nm}$, напречното сечение на прехода е значително по-малко, усредненото ниво на инверсна населеност – пониско и процесът на преразпределяне по-продължителен.

Изменението на коефициента на усилване в зависимост от активиращата мощност и нивото на входния сигнал P_{in} е илюстрирано на фиг. 3. Очевидно е,

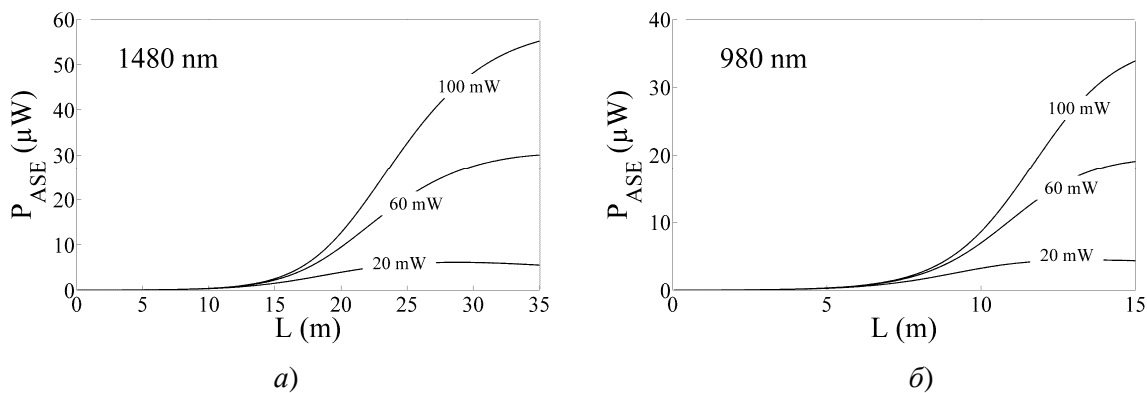
че с увеличаване на мощността на напмпващия източник от 0 до около 15-20 mW усилването на EDFA нараства стръмно. При по-големи активиращи мощности ефективността на усилването, (усилване за един mW активираща мощност) постепенно намалява и при определена стойност на P_p усилвателят започва да работи в режим на насищане.

Анализът показва, че при еднаква напмпваща мощност и ниво на входния сигнал активирането на легираното влакно с 1480 nm лазер осигурява по-голям коефициент на усилване. Например в CATV системи, където нивата на входните сигнали се променят обикновено в границите от -10 dBm до 0 dBm, усилването на EDFA, работещ с $\lambda_p = 1480$ nm, е с около 3-4 dB по-голямо от това, което осигурява усилвателят с 980 nm напмпващ лазер.

Характерът на изменение на коефициента на усилване на EDFA за различни нива на входния сигнал, а именно нарастването му с намаляване на входната оптична мощност, се обяснява с необходимостта от поддържане на относително постоянно ниво на сигнала на изхода на усилвателя (режим на насищане).

4. ШУМОВИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА УСИЛВАТЕЛЯ

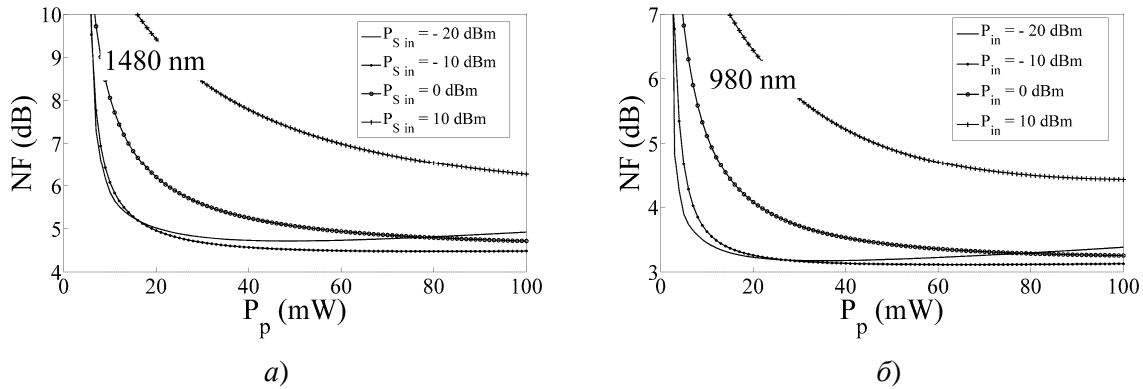
На фиг. 4 е показано изменението на генерираната шумова мощност от ASE (P_{ASE}) по дължината на легираното влакно за различни стойности на напмпващата мощност и ниво на входния сигнал -20 dBm. При изследването дължината на влакното е ограничена до оптималната (15 m, респ. 35 m), определена от дадените по-горе зависимости на коефициента на усилване. Както се вижда от фигурите, когато активиращото излъчване е с дължина на вълната 980 nm, нивото на шума от ASE е по-ниско в сравнение с това, което се констатира при работа с $\lambda_p = 1480$ nm, което се обяснява с по-малката ефективна дължина на легираното влакно в първия случай.



Фиг. 4. Изменение на P_{ASE} по дължината на легираното влакно при $P_p = \text{const}$

Зависимостите на фиг. 4 показват, че P_{ASE} нараства с увеличаване на напмпващата мощност и при насищане достига максималната си стойност. От направените изследвания е установено, че с увеличаване на нивото на входния сигнал генерираната шумова мощност намалява, причина за което е нарастването на дела на стимулираната по отношение на спонтанната емисия.

За оценка на влиянието на мощностите на активирания лазер и на входния сигнал върху коефициента на шум (NF) на изследвания EDFA могат да се използват зависимостите на фиг. 5. Очевидно е, че съществуват прагови нива на наpomпващата мощност (около 15 mW при работа с $\lambda_p = 980$ nm и около 20 mW при $\lambda_p = 1480$ nm), под които се наблюдава рязко увеличаване на шумовия коефициент на усилвателя.



Фиг. 5. Зависимост на NF от P_p при $P_{in} = \text{const}$

Ако се сравнят зависимостите на коефициента на шум на EDFA, дадени на фиг. 5а и 5б, при еднакви наpomпващи мощности и нива на входните сигнали, може да се направи следният извод. При активирането на усилвателя с 980 nm лазерен източник се осигурява по-малък коефициент на шум, който при отчитане на типичните за CATV системи нива на входните сигнали варира в границите 3,25 - 3,45 dB. Когато в този тип системи се използва EDFA, в който наpomпващата дължина на вълната е 1480 nm, коефициентът на шум е 4,45.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработените във връзка с тези изследвания програмни продукти дават възможност по зададени физически параметри на EDFA, усилване и коефициент на шум да се оптимизира дължината на легираното влакно, мощността на наpomпващия лазер и динамичния обхват на входните сигнали. Освен това те позволяват да се реши и обратната задача, при която се цели да бъдат получени характеристиките на усилване и шум на EDFA с известни параметри.

6. REFERENCES

- [1]. A. Cokrak, A. Altuncu, Gain And Noise Figure Performance Of Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFA). *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 4, No 2, Istanbul, June 2004.
- [2]. P. Becker, N. Olsson, J. Simpson, *Erbium-Doped Fiber Amplifier – Fundamental and Technologies*. Academic Press. 1997.
- [3]. Ph. Bao, Le Son, Gain and noise in erbium-doped fiber amplifier (EDFA) – a rate equation approach (REA). *Communications in Physics*, Vol. 4, No 2, 2004, pp. 1-6.