

KHẢO SÁT SỰ PHỤ THUỘC CÁC ĐẶC TRƯNG KHUẾCH ĐẠI CỦA BỘ KHUẾCH ĐẠI QUANG SỢI PHA TẠP ERBIUM (EDFA) Ở BƯỚC SÓNG KÍCH THÍCH 1480NM

**A SURVEY ON THE DEPENDENCE OF AMPLIFIED CHARACTERISTICS OF AN
ERBIUM DOPED FIBER AMPLIFIER (EDFA) AT A STIMULATING
WAVELENGTH OF 1480NM**

Nguyễn Quý Tuấn

Trường Đại học Sư phạm, Đại học Đà Nẵng

TÓM TẮT

Bộ khuếch đại quang sợi EDFA có thể hoạt động hiệu quả ở hai bước sóng bơm là 980nm và 1480nm. Trong bài báo này, tôi đã viết các chương trình mô phỏng một EDFA, hoạt động ở bước sóng bơm 1480nm và bước sóng tín hiệu 1550nm, bằng ngôn ngữ lập trình Matlab. Trên cơ sở giải hệ phương trình tốc độ và hệ phương trình truyền dẫn của EDFA, các chương trình mô phỏng này đã tìm ra sự phụ thuộc của các đặc trưng khuếch đại vào các thông số đầu vào như công suất bơm và công suất tín hiệu, chiều dài sợi pha tạp. Các kết quả được biểu diễn trên đồ thị cho thấy hệ số khuếch đại sẽ tăng theo công suất bơm và ít biến đổi theo công suất tín hiệu. Tuy nhiên, nếu công suất tín hiệu vào quá nhỏ thì hệ số tạp âm sẽ có giá trị lớn.

ABSTRACT

The Erbium doped fiber amplifier (EDFA) can operate effectively at the two pump wavelengths of 980nm and 1480nm. In this paper, I present simulated programs for an EDFA, which operate at the 1480nm forward pump wavelength by means of the Matlab Software. Based on the solution of the EDFA rate and propagating equations, simulated programs indicated that the dependence of amplified characters on such input factors as pump capacity and signal capacity. The graphical results show that the gain will rise with an increase of pump power and vary little with a decrease of signal power. However, the noise figure will increase if there is a decrease in the signal power.

1. Đặt vấn đề

Cáp quang có các ưu điểm như tốc độ truyền tin nhanh, dung lượng lớn và gọn nhẹ, v.v. Vì vậy, các tuyến thông tin cáp quang phát triển mạnh ở hầu hết các quốc gia trên thế giới. Để các tuyến cáp quang phát huy hết hiệu quả, hệ thống truyền tin phải có các bộ khuếch đại phù hợp. Bộ khuếch đại đang được nghiên cứu và sử dụng khá phổ biến hiện nay là bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA) [1, 4].

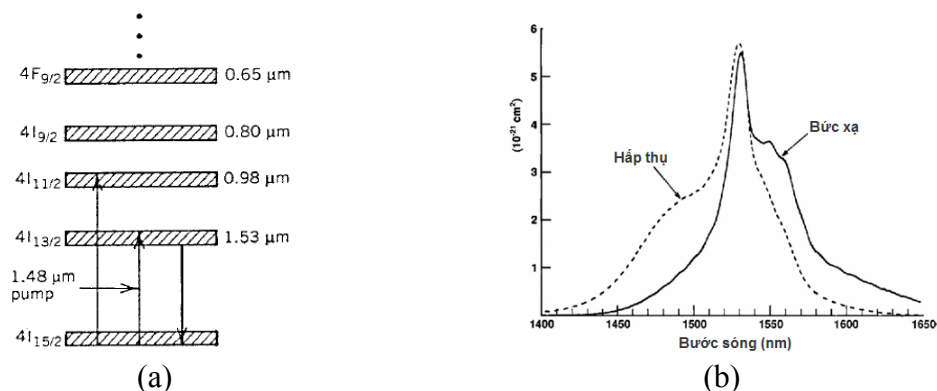
EDFA có thể được kích thích bởi các bước sóng bơm 980nm và 1480nm. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng một EDFA được kích thích bởi bơm một bơm đồng hướng bước sóng 1480nm vì nó cho hiệu suất lượng tử lớn hơn bơm 980nm [1]. Sau khi thiết lập hệ phương trình động lực cho EDFA này, chúng tôi tiến hành viết chương trình

mô phỏng để khảo sát các đặc trưng khuếch đại của EDFA. Trong bài báo này, lý thuyết về EDFA được trình bày ngắn gọn trong phần 2; phần 3 đưa ra các kết quả mô phỏng thu được và các nhận xét, bàn luận.

2. Các lý thuyết về EDFA

2.1. Giảm đồ năng lượng

Giảm đồ các mức năng lượng của Er^{3+} được mô tả trong hình 1a [4]. Khi được kích thích bởi các photon có bước sóng thích hợp, các ion Er^{3+} ở mức $^4\text{I}_{15/2}$ (mức nền) sẽ nhảy lên các mức năng lượng cao. Thời gian sống ở các mức kích thích nhỏ nên hầu như ngay lập tức các ion này sẽ chuyển không bức xạ về mức $^4\text{I}_{13/2}$ (mức siêu bền) và lưu trú ở đây trong thời gian khoảng 10ms [4]. Sau đó, các ion này sẽ tiếp tục chuyển về mức $^4\text{I}_{15/2}$ và phát ra photon có bước sóng nằm trong dãy C (1525nm đến 1565nm) [1]. Thời gian sống ở mức siêu bền lớn nên EDFA có thể khuếch đại được tín hiệu.



Hình 1. a) Giảm đồ các mức năng lượng của sợi thủy tinh pha tạp Er.

b) Phổ hấp thụ và bức xạ của sợi thủy tinh pha tạp Er.

Với mỗi bước sóng khả dĩ truyền vào trong sợi pha tạp, ion Er^{3+} sẽ hấp thụ và bức xạ với các tiết diện hấp thụ và tiết diện bức xạ khác nhau. Sự phụ thuộc của tiết diện hấp thụ và tiết diện bức xạ của ion Er^{3+} theo bước sóng được mô tả trong hình 1b. Trong bài báo này, bước sóng tín hiệu 1550nm được chọn khảo sát vì nó có tiết diện bức xạ lớn hơn tiết diện hấp thụ [1].

2.2. Hệ phương trình tốc độ và hệ phương trình truyền dẫn

Trong trường tĩnh thể, do hiệu ứng tách mức năng lượng nên các mức mức $^4\text{I}_{15/2}$ và $^4\text{I}_{13/2}$ được mở rộng thành một dải các mức năng lượng con nên khoảng cách giữa đỉnh và đáy của mức $^4\text{I}_{13/2}$ khá rộng. Vì vậy, sợi quang pha tạp Erbium (EDF) vẫn có thể khuếch đại tín hiệu khi được kích thích bởi bước sóng bơm 1480nm. Khi EDF được kích thích bởi bơm 1480nm, các ion Er^{3+} chỉ nhảy lên đến đỉnh vùng siêu bền $^4\text{I}_{13/2}$, di chuyển không bức xạ về các mức năng lượng còn trống ở đáy của vùng này. Sau khoảng thời gian sống τ , các ion này sẽ bức xạ photon và chuyển về mức nền $^4\text{I}_{15/2}$ [3].

Các ion Er^{3+} chỉ hoạt động trong hai dải năng lượng $^4\text{I}_{13/2}$ và $^4\text{I}_{15/2}$ nên sự phụ thuộc nồng độ ion Er^{3+} ở các mức theo thời gian sẽ có dạng:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{1}{\tau}N_2 + (N_1\sigma_s^a - N_2\sigma_s^e)\Phi_s + (N_1\sigma_p^a - N_2\sigma_p^e)\Phi_p \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{1}{\tau}N_2 - (N_1\sigma_s^a - N_2\sigma_s^e)\Phi_s - (N_1\sigma_p^a - N_2\sigma_p^e)\Phi_p \quad (2)$$

với $\sigma_s^a, \sigma_s^e, \sigma_p^a, \sigma_p^e$ lần lượt là hệ số hấp thụ, hệ số bức xạ của tín hiệu và bơm; τ là thời gian sống ở mức siêu bền $^4I_{13/2}$; N_1, N_2 là mật độ photon phân bố ở mức nền $^4I_{15/2}$ và

mức siêu bền $^4I_{13/2}$; $\Phi_s = \frac{\Gamma_s}{h\nu_s A_{eff}} P_s$; $\Phi_p = \frac{\Gamma_p}{h\nu_p A_{eff}} P_p$: là thông lượng photon của tín hiệu và bơm [3], trong đó, $\Gamma_s, \Gamma_p, \nu_s, \nu_p$ lần lượt là hệ số chồng phủ và tần số của tín hiệu và bơm; A_{eff} tiết diện phân bố ion Er^{3+} hiệu dụng; h là hằng số Plank; P_s, P_p : công suất tín hiệu và công suất bơm đưa vào trong sợi.

Khi hệ đạt đến trạng thái dừng, các mật độ $N_1(z, t), N_2(z, t)$ sẽ là các hàm số chỉ phụ thuộc vào tọa độ z dọc theo chiều dài sợi. Hơn nữa, cùng với tín hiệu và bơm, bức xạ tự phát (ASE) cũng làm ảnh hưởng đến sự phân bố mật độ ion Er^{3+} trên các mức năng lượng trong EDF. Vì vậy, khi giải các phương trình (1) và (2) trong trạng thái dừng, có tính đến ảnh hưởng của ASE, ta được:

$$N_1 = N - N_2 \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{\frac{\tau\sigma_s^a}{h\nu_s A_{eff}} \frac{\Gamma_s}{A_{eff}} P_s + \frac{\tau\sigma_{ASE}^a}{h\nu_{ASE} A_{eff}} \frac{\Gamma_s}{A_{eff}} P_A + \frac{\tau\sigma_p^a}{h\nu_p A_{eff}} \frac{\Gamma_p}{A_{eff}} P_p}{1 + \frac{\tau(\sigma_s^a + \sigma_s^e)}{h\nu_s A_{eff}} \frac{\Gamma_s}{A_{eff}} P_s + \frac{\tau(\sigma_{ASE}^a + \sigma_{ASE}^e)}{h\nu_{ASE} A_{eff}} \frac{\Gamma_s}{A_{eff}} P_A + \frac{\tau(\sigma_p^a + \sigma_p^e)}{h\nu_p A_{eff}} \frac{\Gamma_p}{A_{eff}} P_p} N \quad (4)$$

với N là tổng mật độ ion Er^{3+} có trong sợi khuếch đại, $\sigma_{ASE}^a, \sigma_{ASE}^e, \nu_{ASE}$ lần lượt là hệ số hấp thụ, hệ số bức xạ và tần số của ASE.

Khi tín hiệu và bơm được truyền vào trong sợi, công suất của chúng sẽ thay đổi dọc theo chiều dài sợi do sự hấp thụ, bức xạ kích thích và bức xạ tự phát. Sự phụ thuộc của công suất bơm, công suất tín hiệu theo tọa độ z dọc theo sợi được mô tả bởi các phương trình truyền dẫn. Bài báo này khảo sát EDFA với bơm xuôi nên các phương trình truyền dẫn của của bơm, tín hiệu và ASE có dạng [1]:

$$\frac{dP_p}{dz} = (N_2\sigma_p^e - N_1\sigma_p^a)\Gamma_p P_p - \alpha_p P_p \quad (5)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (N_2\sigma_s^e - N_1\sigma_s^a)\Gamma_s P_s - \alpha_s P_s \quad (6)$$

$$\frac{dP_A^\pm(\nu_j)}{dz} = \pm(N_2\sigma_{ASE}^e - N_1\sigma_{ASE}^a)\Gamma_s P_A^\pm \pm 2h\nu_{ASE}\Delta\nu_{ASE}N_2\sigma_{\nu_j}^e \mp \alpha_{ASE} P_A^\pm \quad (7)$$

với α_s, α_p là hệ số suy hao đối với tín hiệu và bơm; ν_{ASE} là tần số của ASE.

2.3. Hệ số khuếch đại và hệ số tạp âm

Hệ số khuếch đại G (dB) của bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Er^{3+} có chiều dài L là tỉ số giữa công suất tín hiệu đầu ra $P_s(L)$ và công suất tín hiệu đầu vào $P_s(0)$ [1]:

$$G = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s(L)}{P_s(0)} \right) \text{ [dB]} \quad (8)$$

Đối với một bộ khuếch đại, hệ số tạp âm cũng là một trong các thông số đáng quan tâm. Tạp âm gây ra bởi công suất bức xạ tự phát đồng hướng nên hệ số tạp âm được tính theo hệ số khuếch đại và công suất bức xạ tự phát theo biểu thức [1]:

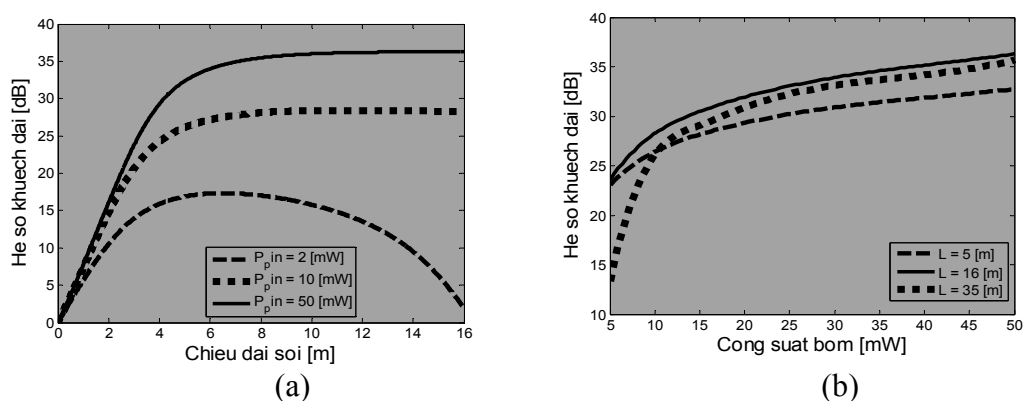
$$NF = \left(\frac{1}{G} + \frac{2P_A^+}{Gh\nu\Delta\nu} \right) \quad (9)$$

3. Kết quả nghiên cứu và bình luận

Trong bài báo này, các phương trình động lực (3, 4, 5, 6, 7) được giải bằng các chương trình mô phỏng viết trên ngôn ngữ lập trình Matlab. Nghiệm của hệ phương trình này sẽ là công suất bơm, công suất tín hiệu và công suất ASE dọc theo chiều dài của sợi quang. Từ các đại lượng này, bài báo tiến hành tính toán hệ số khuếch đại và hệ số tạp âm của EDFA. Trong chương trình mô phỏng này, EDFA hoạt động với bơm kích thích bước sóng $\lambda_p = 1480\text{nm}$, phun vào đồng hướng với tín hiệu ở bước sóng $\lambda_s = 1550\text{nm}$. Tín hiệu và bơm được đưa vào trong sợi cùng chiều tại vị trí $z=0$, với công suất ban đầu $P_s|_{z=0} = P_{s0}$, $P_p|_{z=0} = P_{p0}$.

3.1. Hệ số khuếch đại G

Hình 2a cho thấy sự thay đổi của hệ số khuếch đại dọc theo các vị trí trong sợi pha tạp chiều dài 16m, với các công suất bơm 2mW, 10mW, 50mW. Với các công suất bơm đủ lớn, ở đoạn đầu của sợi có sự nghịch đảo độ tích lũy lớn nên công suất tín hiệu và hệ số khuếch đại tăng nhanh và tiến đến giá trị bão hòa. Với các công suất bơm yếu (2mW), sau khi hệ số khuếch đại đạt đến giá trị cực đại (khá nhỏ), nó sẽ bị giảm dần cho đến cuối sợi.



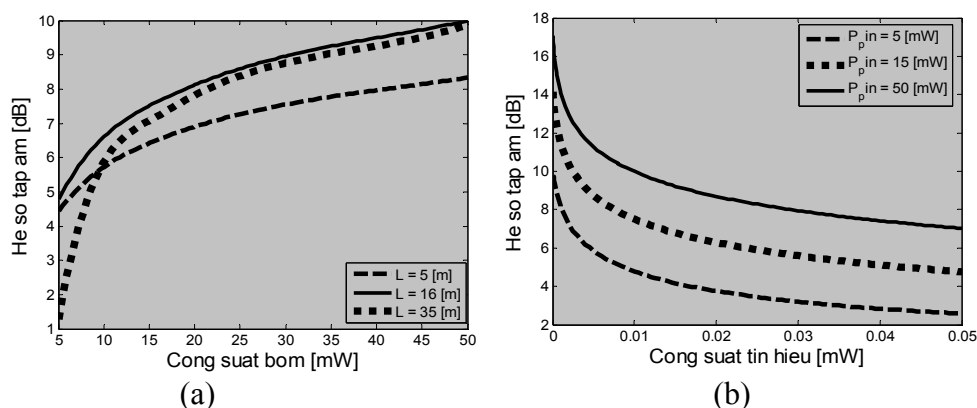
Hình 2. a) Sự biến đổi của hệ số khuếch đại theo chiều dài.

b) Sự biến đổi của hệ số khuếch đại theo công suất bơm.

Hình 2b cho thấy sự thay đổi của hệ số khuếch đại theo công suất bơm với các sợi có chiều dài khác nhau 5m, 16m và 35m. Hình vẽ chỉ ra khi tăng công suất bơm thì hệ số khuếch đại sẽ tăng lên, nhưng hệ số khuếch đại tăng chậm hơn công suất bơm. Điều này được giải thích là do ảnh hưởng của sự bức xạ tự phát, công suất bơm càng lớn thì bức xạ tự phát càng mạnh, do đó làm hạn chế sự tăng của công suất tín hiệu. Hơn nữa, hình 2b còn cho thấy các sợi có chiều dài khác nhau (cùng nồng độ pha tạp Er) sẽ có hệ số khuếch đại khác nhau khi thay đổi công suất bơm. Kết quả này cho thấy, trong thiết kế sợi khuếch đại, cần phải tính toán chiều dài tối ưu với một nồng độ pha tạp hợp lý.

3.2. Hệ số tạp âm NF

Sự phụ thuộc của hệ số tạp âm như là một hàm của công suất bơm với các sợi có chiều dài khác nhau được biểu diễn trong hình 3a. Hệ số tạp âm sẽ tăng nhanh cùng với việc tăng công suất bơm đưa vào trong sợi. Công suất bơm càng cao, hệ số tạp âm càng lớn. Tuy nhiên, tốc độ tăng của hệ số tạp âm không tỉ lệ tuyến tính với tốc độ tăng công suất bơm.



Hình 3: a) Sự thay đổi của hệ số tạp âm theo công suất bơm.

b) Sự thay đổi của hệ số tạp âm theo công suất tín.

Hình 3b biểu diễn sự thay đổi của hệ số tạp âm vào công suất tín hiệu với các công suất bơm khác nhau. Kết quả này cho thấy hệ số tạp âm có giá trị lớn ở vùng công suất tín hiệu nhỏ và giảm nhanh khi tăng công suất tín hiệu vào. Với công suất tín hiệu lớn, hệ số tạp âm nhỏ và giảm chậm khi tăng công suất tín hiệu vào. Nguyên nhân là do khi công suất tín hiệu đưa vào tăng dần, tín hiệu được khuếch đại mạnh dần sẽ làm tăng tỉ lệ tín hiệu trên tạp ở lối ra và do đó làm giảm mạnh hệ số tạp âm.

4. Kết luận

Hệ số khuếch đại và hệ số tạp âm là những thông số quan trọng khi khảo sát một bộ khuếch đại. Các đặc trưng khuếch đại này của EDFA phụ thuộc mạnh vào các thông số như chiều dài sợi pha tạp, công suất bơm và công suất tín hiệu vào. Vì vậy, để sử dụng tối đa các ưu điểm của EDFA cần tính toán cụ thể dựa trên các yêu cầu thực tiễn để lựa chọn bộ khuếch đại có chiều dài sợi EDF hợp lý, có công suất bơm thích hợp, khoảng cách lắp đặt 2 EDFA liên tiếp để đảm bảo công suất tín hiệu vào không quá nhỏ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. P. Agrawal, *Fiber optic communication systems*, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [2] S. Kinoshita, R. Rabbat, “Optical Transport Systems/Networks and Control by Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)”, *Apnoms*, September 2005.
- [3] A.Cem Çorkrak, A. Altuncu, “Gain and noise figure performance of erbium doped fiber amplifiers (EDFA)” *Istanbul university – Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Vol. 4, No 2, 2004.
- [4] P. C. Becker, N. A. Olsson, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*, Academic Press, 1999.