

## - CHƯƠNG 2 -

### KHUẾCH ĐẠI QUANG

#### 2.1- GIỚI THIỆU CHUNG

Trong các hệ thống thông tin quang, cự li truyền đều bị giới hạn bởi suy hao của sợi quang. Đối với các hệ thống thông tin quang cự ly dài, để bù suy hao thường sử dụng các trạm lặp quang - điện, trong đó tín hiệu quang được chuyển thành tín hiệu điện, tái tạo xung và chuyển tín hiệu điện thành tín hiệu quang để tiếp tục truyền đi. Các trạm lặp như vậy rất phức tạp và giá thành cao đối với hệ thống quang WDM. Một giải pháp khác để bù suy hao là dùng các bộ khuếch đại quang, để khuếch đại trực tiếp tín hiệu quang mà không yêu cầu chuyển đổi trong miền điện.

So với các trạm lặp quang - điện, các bộ khuếch đại quang có các ưu điểm sau:

- Khuếch đại trực tiếp tín hiệu quang.
- Không phụ thuộc vào tốc độ bit và phương thức điều chế tín hiệu nên nâng cấp hệ thống đơn giản hơn.
- Khuếch đại đồng thời được nhiều kênh bước sóng khác nhau trong hệ thống quang.

Hầu hết các bộ khuếch đại quang khuếch đại ánh sáng tới thông qua phát xạ kích thích, giống như laser. Tuy nhiên, bộ khuếch đại quang sợi không có hồi tiếp quang. Nguyên lý cơ bản của khuếch đại quang là sử dụng năng lượng bơm quang hoặc điện để thực hiện đảo mật độ. Nói chung, hệ số khuếch đại quang phụ thuộc không chỉ vào tần số (hoặc bước sóng) của tín hiệu quang tới, mà còn phụ thuộc vào cả cường độ ánh sáng bơm bên trong bộ khuếch đại. Sự phụ thuộc của hệ số khuếch đại quang vào tần số và cường độ tín hiệu quang nhiều hay ít còn phụ thuộc vào môi trường khuếch đại.

#### 2.1.1 Các tham số cơ bản

##### 2.1.1.1 Hệ số khuếch đại

Hệ số khuếch đại (G) được định nghĩa là:

$$G = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} \quad (2.1)$$

$$G \text{ (dB)} = 10 \log (P_{\text{out}} / P_{\text{in}}) \quad (2.2)$$

trong đó,  $P_{\text{in}}$  và  $P_{\text{out}}$  là công suất đầu vào và đầu ra của bộ khuếch đại quang [mW].

Hệ số khuếch đại là một tham số quan trọng của bộ khuếch đại. Nó đặc trưng cho khả năng khuếch đại công suất ánh sáng của bộ khuếch đại. Tuy vậy, hệ số khuếch đại bị giới hạn bởi các cơ chế bão hòa khuếch đại. Điều này làm giới hạn công suất quang ra cực đại của bộ khuếch đại.

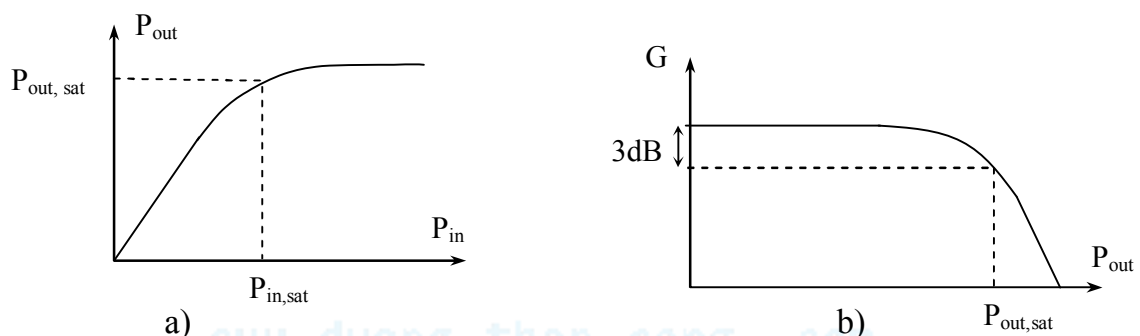
### 2.1.1.2 Độ rộng băng tần khuếch đại

Hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại quang là không bằng nhau với tất cả các tần số của tín hiệu quang vào. Nếu đo hệ số khuếch đại  $G$  của các tín hiệu quang ở các tần số khác nhau sẽ nhận được một đáp ứng tần số quang của bộ khuếch đại  $G(f)$ . Đây chính là độ rộng băng tần khuếch đại của bộ khuếch đại quang.

Độ rộng băng tần khuếch đại của bộ khuếch đại quang  $B_0$  được xác định bởi điểm  $-3\text{dB}$  so với hệ số khuếch đại đỉnh của bộ khuếch đại. Giá trị  $B_0$  xác định băng thông của các tín hiệu có thể được truyền bởi một bộ khuếch đại quang. Do đó, ảnh hưởng đến hoạt động của các hệ thống thông tin quang khi sử dụng chúng.

### 2.1.1.3 Công suất ra bão hòa

Khi hoạt động ở chế độ tín hiệu nhỏ, công suất quang ở đầu ra sẽ tăng tuyến tính với công suất quang ở đầu vào theo hệ số khuếch đại  $G$ :  $P_{\text{out}} = G \cdot P_{\text{in}}$ . Tuy nhiên, công suất đầu ra không thể tăng mãi được. Bằng thực nghiệm, cho thấy rằng trong tất cả các bộ khuếch đại quang, khi công suất đầu vào  $P_{\text{in}}$  tăng đến một mức nào đó, hệ số khuếch đại  $G$  bắt đầu giảm. Kết quả là công suất ở đầu ra không còn tăng tuyến tính với tín hiệu đầu vào nữa mà đạt trạng thái bão hòa. Sự thay đổi của tín hiệu quang đầu ra so với công suất quang đầu vào ở được minh họa trong hình 2.1a.



Hình 2.1 a) Công suất đầu ra liên quan với công suất đầu vào

b) Hệ số khuếch đại liên quan với công suất quang đầu ra

Hình 2.1b biểu diễn sự thay đổi của hệ số khuếch đại  $G$  theo công suất quang đầu ra  $P_{\text{out}}$ . Công suất ở đầu ra tại điểm  $G$  giảm 3 dB được gọi là công suất ra bão hòa  $P_{\text{sat, out}}$ .

Công suất ra bão hòa  $P_{\text{sat, out}}$  của một bộ khuếch đại quang cho biết công suất đầu ra lớn nhất mà bộ khuếch đại quang đó có thể hoạt động được. Thông thường,

một bộ khuếch đại quang có hệ số khuếch đại cao sẽ có công suất ra bão hòa cao bởi vì sự nghịch đảo nồng độ cao có thể được duy trì trong một dải công suất vào và ra rộng.

#### 2.1.1.4 Hệ số nhiễu

Giống như các bộ khuếch đại điện, các bộ khuếch đại quang đều tạo ra nhiễu. Nguồn nhiễu chính trong các bộ khuếch đại quang là do phát xạ tự phát. Vì sự phát xạ tự phát là các sự kiện ngẫu nhiên, pha của các photon phát xạ tự phát cũng ngẫu nhiên. Nếu photon phát xạ tự phát có hướng gần với hướng truyền của các photon tín hiệu, chúng sẽ tương tác với các photon tín hiệu gây nên sự dao động về pha và biên độ. Bên cạnh đó, năng lượng do phát xạ tự phát tạo ra cũng sẽ được khuếch đại khi chúng truyền qua bộ khuếch đại về phía đầu ra. Do đó, tại đầu ra của bộ khuếch đại công suất quang thu được  $P_{out}$  bao gồm cả công suất tín hiệu được khuếch đại và công suất nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE).

$$P_{out} = G.P_{in} + P_{ASE} \quad (2.3)$$

Ảnh hưởng của nhiễu đối với bộ khuếch đại quang được biểu diễn bởi hệ số nhiễu (NF), mô tả lượng suy giảm tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR) sau khi qua bộ khuếch đại. Hệ số NF được cho bởi công thức sau:

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (2.4)$$

$$NF \text{ (dB)} = 10 \log \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (2.5)$$

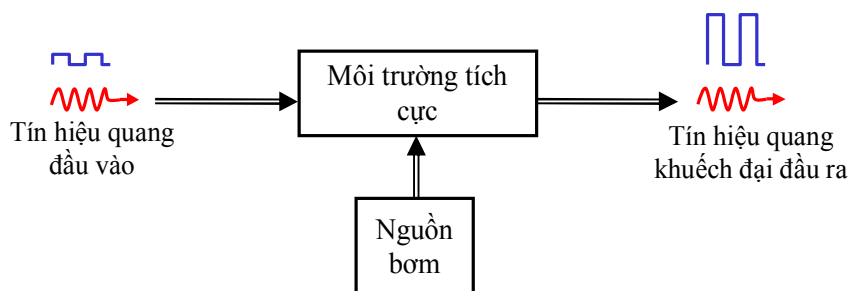
trong đó,  $SNR_{in}$ ,  $SNR_{out}$  là tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại đầu vào và đầu ra của bộ khuếch đại [mW].

Hệ số nhiễu NF của bộ khuếch đại càng nhỏ thì càng tốt. Giá trị nhỏ nhất của NF có thể đạt được là 3dB. Những bộ khuếch đại thỏa mãn hệ số nhiễu tối thiểu này được gọi là đang hoạt động ở giới hạn lượng tử.

#### 2.1.2 Phân loại

Cấu tạo chung của bộ khuếch đại quang được biểu diễn tại hình 2.2.

Trong một bộ khuếch đại quang, quá trình khuếch đại ánh sáng được diễn ra trong một môi trường được gọi vùng tích cực. Các tín hiệu quang được khuếch đại trong vùng tích cực với hệ số khuếch đại lớn hay nhỏ tùy thuộc vào năng lượng được cung cấp từ một nguồn bên ngoài gọi chung là nguồn bơm. Các nguồn bơm này có tính chất như thế nào tùy thuộc vào loại bộ khuếch đại quang hay nói cách khác, phụ thuộc vào cấu tạo của vùng tích cực. Tùy theo cấu tạo của vùng tích cực, có thể chia khuếch đại quang thành hai loại chính:



Hình 2.2 - Mô hình tổng quát của bộ khuếch đại quang

### 2.1.2.1 Bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA

- Vùng tích cực được cấu tạo bằng vật liệu bán dẫn.
- Cấu trúc của vùng tích cực của SOA tương tự như vùng tích cực của laser bán dẫn. Điểm khác biệt chính giữa SOA và laser là SOA hoạt động ở trạng thái dưới mức ngưỡng phát xạ.
- Nguồn cung cấp năng lượng để khuếch đại tín hiệu quang là dòng điện

### 2.1.2.2 Khuếch đại quang sợi OFA

- Vùng tích cực là sợi quang được pha đất hiếm. Do đó, OFA còn được gọi là DFA
- Nguồn bơm là năng lượng ánh sáng được cung cấp bởi các laser có bước sóng phát quang nhỏ hơn bước sóng của tín hiệu cần khuếch đại.
- Tùy theo loại đất hiếm được pha trong lõi của sợi quang, bước sóng bơm của nguồn bơm và vùng ánh sáng được khuếch đại của OFA sẽ thay đổi. Một số loại OFA tiêu biểu:

- + EDFA - Bộ khuếch đại sợi pha Erbium: 1530nm – 1565nm
- + PDFA - Bộ khuếch đại sợi pha Praseodymium: 1280nm – 1340nm
- + TDFA - Bộ khuếch đại sợi pha Thulium: 1440nm -1520nm
- + NDFA- Bộ khuếch đại sợi pha Neodymium: 900nm, 1065nm hoặc 1400nm

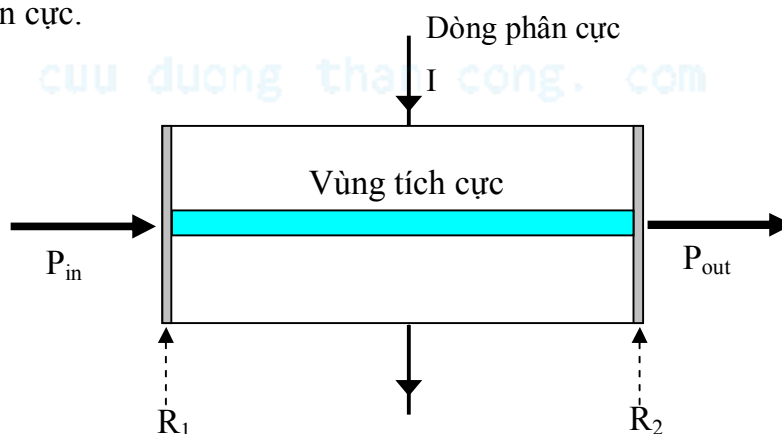
Trong các loại OFA này, EDFA được sử dụng phổ biến hiện nay vì có nhiều ưu điểm về đặc tính kỹ thuật so với SOA và có vùng ánh sáng khuếch đại (1530nm-1565nm) thích hợp với dải tần hoạt động của hệ thống ghép kênh theo bước sóng mật độ cao DWDM. Chi tiết về EDFA sẽ được trình bày trong phần 2.3 của chương này.

Cả hai loại khuếch đại quang SOA và EDFA đều hoạt động dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích. Ngoài ra, một loại khuếch đại quang khác cũng được sử dụng nhiều trong các hệ thống WDM hiện nay là khuếch đại Raman. Loại khuếch đại này cũng sử dụng sợi quang làm vùng tích cực để khuếch đại ánh sáng. Tuy nhiên, nguyên lý khuếch đại của bộ khuếch đại Raman dựa trên ảnh hưởng phi tuyến của sợi quang (hiện tượng tán xạ Raman được kích thích SRS) hơn là hiện tượng phát xạ kích thích. Chi tiết về loại khuếch đại này sẽ được trình bày dưới đây.

## 2.2- KHUẾCH ĐẠI QUANG BÁN DẪN (SOA)

### 2.2.1 Cấu trúc và nguyên lý khuếch đại tín hiệu

Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA tương tự như laser bán dẫn. Nghĩa là cũng dựa vào hệ thống hai dải năng lượng của chất bán dẫn và các quá trình biến đổi quang điện: hấp thụ, phát xạ tự phát và phát xạ kích thích. Trong đó, tín hiệu quang được khuếch đại dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích xảy ra trong vùng tích cực của SOA. Vùng tích cực này được đặt giữa hai lớp bán dẫn loại n và p (xem hình 2.3). Nguồn bơm bên ngoài được cung cấp bởi dòng điện phân cực.



Hình 2.3 Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA

Do có cấu trúc và nguyên lý hoạt động tương tự với laser bán dẫn nên SOA còn được gọi là bộ khuếch đại laser bán dẫn SLA.

Sự khác nhau chính giữa SOA và laser bán dẫn là SOA hoạt động dưới mức ngưỡng dao động. Điều kiện này xảy ra khi dòng điện phân cực  $I_{bias} < I_{th}$  của laser hoặc/và hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của vùng tích cực nhỏ. Khi đó, quá trình phản xạ, cộng hưởng và tự phát xạ ánh sáng sẽ không xảy ra.

SOA có thể được phân thành hai loại chính dựa vào hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của lớp tích cực. Loại thứ nhất, bộ khuếch đại Fabry-Perot FPA có hệ số phản xạ cao (có thể lên tới 32%). Cấu trúc của FPA cũng tương tự như laser Fabry-Perot nhưng hoạt động với dòng phân cực  $I_{bias} < I_{th}$ . Với cấu trúc hốc cộng

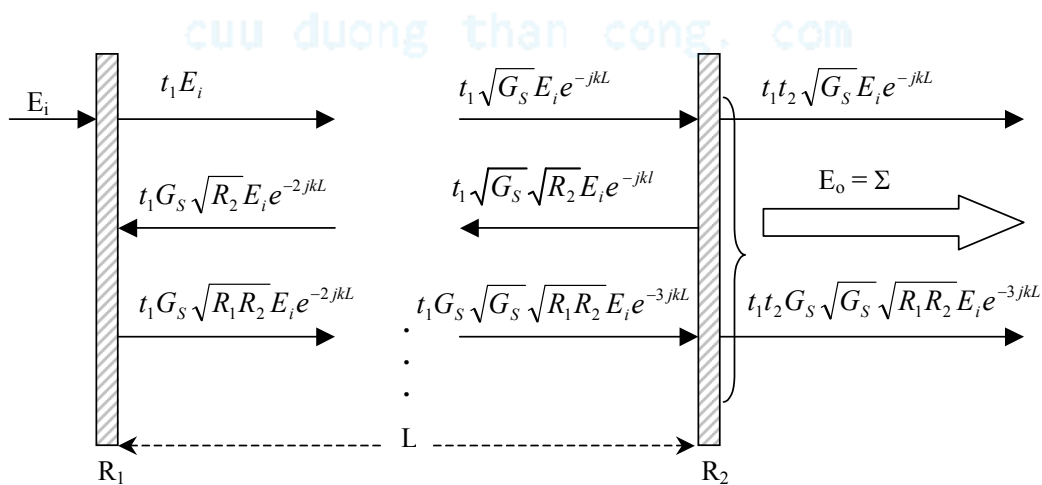
hường có hệ số phản xạ cao, quá trình hồi tiếp, chọn lọc tần số xảy ra. Kết quả là, FPA có hệ số khuếch đại cao nhưng phổ hệ số khuếch đại nháp nhô, không đều. Điều này làm giảm băng thông của bộ khuếch đại FPA.

Để khắc phục hạn chế trên đây của FPA, hai lớp chống phản xạ AR có hệ số phản xạ  $R = 0$ , được đặt tại hai đầu của vùng tích cực để không cho quá trình phản xạ xảy ra bên trong bộ khuếch đại. Khi đó, tín hiệu vào SOA sẽ được khuếch đại khi chỉ đi qua một lần xuyên qua vùng tích cực của bộ khuếch đại mà không có hồi tiếp về. Đây là cấu trúc của loại SOA thứ hai: khuếch đại sóng chạy TWA. Trên thực tế, hệ số phản xạ ở hai đầu của vùng tích cực của TWA không hoàn toàn bằng 0 mà có giá trị rất nhỏ từ 0.1% đến 0.01%.

## 2.2.2 Các tham số

### 2.2.2.1 Đặc tính của bộ khuếch đại FPA và TWA

Xét một bộ khuếch đại FPA có hệ số phản xạ công suất ở hai mặt phản xạ của lớp tích cực là  $R_1$  và  $R_2$  như hình 2.4. Bộ khuếch đại này cũng có thể TWA nếu cho  $R_1 = R_2 = 0$ . Do đó, quá trình phân tích sau đây đều có thể áp dụng cho FPA và TWA.



Hình 2.4- Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra trong FPA

Bỏ qua suy hao khi ánh sáng truyền qua mỗi mặt phản xạ, ta có hệ số xuyên qua của công suất ánh sáng đi qua mỗi mặt phản xạ tương ứng là  $(1-R_1)$  và  $(1-R_2)$ .

Tương ứng, ta có hệ số phản xạ và hệ số xuyên qua của cường độ điện trường tại hai mặt phản xạ là  $\sqrt{R_1}$ ,  $\sqrt{R_2}$  và  $t_1 = \sqrt{1-R_1}$ ,  $t_2 = \sqrt{1-R_2}$ .

Gọi  $G_s$  là hệ số khuếch đại đơn thông của SOA khi tín hiệu quang đi qua vùng tích cực mà không có sự hồi tiếp (hệ số phản xạ  $R=0$ ). Ta có:

$$G_s = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp[(\Gamma g - \alpha)L] \quad (2.6)$$

trong đó:

g: hệ số khuếch đại trên một đơn vị chiều dài của vùng tích cực

$\alpha$ : suy hao trên một đơn vị chiều dài của vùng tích cực

$\Gamma$ : hệ số tập trung biểu diễn mức độ tập trung của luồng ánh sáng bên trong vùng tích cực

L: chiều dài của vùng tích cực

$P_{in}, P_{out}$ : công suất tín hiệu ở đầu vào và đầu ra của bộ khuếch đại

Quá trình khuếch đại tín hiệu ánh sáng trong FPA (xem hình 2.4) có thể được diễn giải như sau:

Điện trường của tín hiệu quang vào  $E_i$  được đưa vào hốc cộng hưởng của FPA có chiều dài L tại mặt phản xạ  $R_1$ . Sau khi xuyên qua mặt phản xạ  $R_1$ , tín hiệu ban đầu sẽ được khuếch đại bởi vùng tích cực và đạt cường độ  $t_1 \sqrt{G_s} E_i e^{-jkL}$  tại mặt phản xạ  $R_2$  (k là hệ số truyền dẫn của môi trường khuếch đại). Tại đây, một phần năng lượng ánh sáng sẽ truyền ra ngoài với cường độ  $t_1 t_2 \sqrt{G_s} E_i e^{-jkL}$ . Phần còn lại sẽ phản xạ ngược trở lại về phía  $R_1$  với cường độ  $t_1 \sqrt{G_s} \sqrt{R_2} E_i e^{-jkL}$ . Tại  $R_1$ , điện trường thu được là  $t_1 G_s \sqrt{R_2} E_i e^{-2jkL}$ . Tương tự như tại  $R_2$ , một phần điện trường  $t_1 G_s \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-2jkL}$  sẽ phản xạ ngược về phía  $R_2$ , phần còn lại sẽ đi ra ngoài hốc cộng hưởng. Sau khi đi qua khoảng cách L của vùng tích cực, tín hiệu thu được tại  $R_1$  đạt giá trị  $t_1 G_s \sqrt{G_s} \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-3jkL}$ . Quá trình phản xạ và truyền xuyên qua mặt phản xạ  $R_2$  tiếp tục diễn ra. Phần tín hiệu xuyên qua có điện trường  $t_1 t_2 G_s \sqrt{G_s} \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-3jkL}$ . Phần còn lại sẽ phản xạ ngược về phía  $R_1$ . Cứ như vậy quá trình phản xạ trong vùng tích cực tiếp tục tiếp diễn.

Điện trường tổng cộng thu được tại đầu ra của bộ khuếch đại sẽ bằng tổng của các thành phần điện trường đi xuyên qua  $R_2$ . Nếu giả sử rằng thời gian truyền trong hốc cộng hưởng nhỏ hơn chu kỳ của điện trường tới  $E_i$ , ta có điện trường thu được tại đầu ra:

$$E_o = E_i e^{-jkL} t_1 t_2 \sum_{m=0}^{\infty} (\sqrt{R_1 R_2} G_s)^m e^{-2mjkL} \quad (2.7)$$

Với  $|\sqrt{R_1 R_2} G_s| < 1$ , biểu thức (2.6) có thể biến đổi thành:

$$E_o = E_i \frac{\sqrt{G_s} t_1 t_2 e^{-jkL}}{1 - \sqrt{R_1 R_2} G_s e^{-2jkL}} \quad (2.8)$$

Hàm truyền đạt công suất của bộ khuếch đại FPA:

$$G_{FPA}(\omega) = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2 = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_s(\omega)}{(1-G_s\sqrt{R_1R_2})^2 + 4G_s\sqrt{R_1R_2}\sin^2 kL} \quad (2.9)$$

Do  $\sin^2(kL) = \sin^2\left(\frac{\omega}{v}L\right) = \sin^2\left(\frac{(\omega-\omega_0)}{v}L\right)$  [5] với  $v$  là vận tốc ánh sáng truyền trong môi trường khuếch đại,  $\omega$  là tần số góc đang xét,  $\omega_0$  là tần số góc cộng hưởng mà tại đó hệ số khuếch đại đạt giá trị lớn nhất. Biểu thức (2.9) được viết lại như sau:

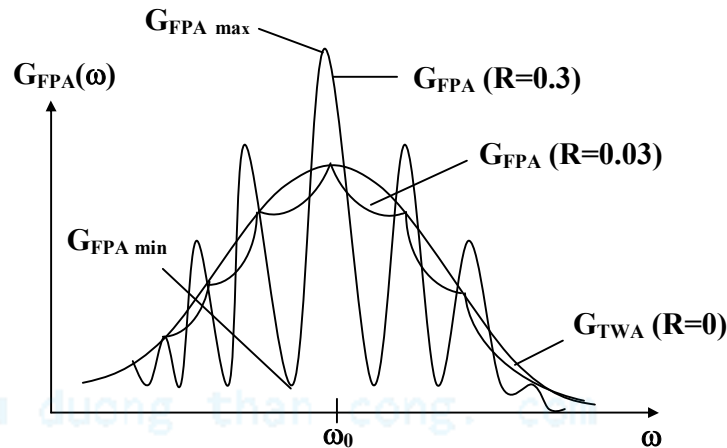
$$G_{FPA}(\omega) = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2 = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_s(\omega)}{(1-G_s\sqrt{R_1R_2})^2 + 4G_s\sqrt{R_1R_2}\sin^2[(\omega-\omega_0)L/v]} \quad (2.10)$$

Nếu hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của FPA bằng nhau  $R_1=R_2=R$ , biểu thức (2.10) trở thành:

$$G_{FPA}(\omega) = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2 = \frac{(1-R)^2 G_s(\omega)}{(1-G_s R)^2 + 4G_s R \sin^2[(\omega-\omega_0)L/v]} \quad (2.11)$$

Hình 2.5 biểu diễn hệ số khuếch đại  $G(f)$  của FPA thay đổi theo tần số với 3 giá trị khác nhau của hệ số phản xạ  $R=0.3$ ,  $R=0.03$  và  $R=0$ .

Giả sử hệ số khuếch đại đơn thông  $G_s$ , tương ứng với  $R=0$  (TWA), có dạng Gauss. Khi hệ số phản xạ của hai lớp phản xạ của vùng tích cực lớn  $R=0.3$ , hệ số khuếch đại  $G(\omega)$  không bằng phẳng theo tần số mà có dạng gợn sóng lớn do chức năng lọc tần số của hốc cộng hưởng.



Hình 2.5 - Hệ số khuếch đại của FPA thay đổi theo tần số

Tại các tần số cộng hưởng  $\omega=(2\pi fN)/(2L)$  với  $N$  là số nguyên, hệ số khuếch đại của FPA đạt giá trị cực đại. Giữa các tần số cộng hưởng, hệ số khuếch đại của FPA giảm nhanh chóng. Do đó, dải tần khuếch đại được xác định tại vị trí -3dB so

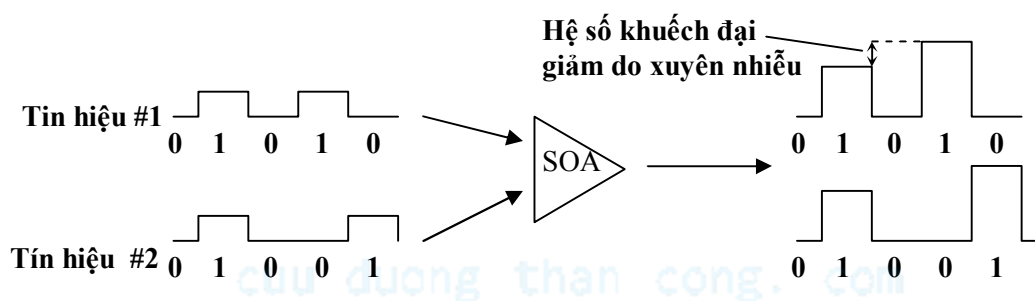
với hệ số khuếch đại đỉnh của FPA nhỏ so với dải tần khuếch đại của TWA. Vì vậy, FPA không thích hợp với các ứng dụng khuếch đại trong hệ thống thông tin quang.

Khi hệ số phản xạ  $R=0.03$ ,  $G(\omega)$  tiến gần tới  $G_s$  nhưng vẫn còn gợn sóng nhỏ. Độ gợn sóng này có thể được loại bỏ bằng cách giảm hệ số phản xạ hơn nữa để bộ khuếch đại trở thành TWA.

### 2.2.2.2 Xuyên nhiễu trong SOA

Xuyên nhiễu xảy ra khi các tín hiệu quang khác nhau được khuếch đại đồng thời trong cùng một bộ khuếch đại. Có hai loại xuyên nhiễu xảy ra trong SOA: xuyên nhiễu kênh và bão hòa hệ số khuếch đại chéo.

Xuyên nhiễu kênh xảy ra là do hiệu ứng trộn bốn bước sóng FWM. Bản chất và ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến này đối với hệ thống thông tin quang WDM được trình bày trong hình 2.6.



Hình 2.6- Ảnh hưởng của xuyên nhiễu kênh trong SOA khi khuếch đại hai tín hiệu

Xuyên nhiễu kênh gây nên do hiện tượng bão hòa hệ số khuếch đại xảy ra trong SOA. Xem xét đầu vào SOA là tổng của hai tín hiệu quang ở các bước sóng khác nhau. Giả thiết rằng cả 2 bước sóng nằm trong băng thông của SOA. Sự có mặt của tín hiệu thứ hai sẽ làm suy giảm mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao do quá trình bức xạ kích thích, dẫn đến sự nghịch đảo nồng độ được quan sát ở tín hiệu thứ nhất giảm xuống. Do đó, tín hiệu thứ nhất sẽ không được khuếch đại giống như tín hiệu thứ hai, và nếu mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao không đủ lớn thì tín hiệu thứ nhất có thể bị hấp thụ. Quá trình này xảy ra đồng thời đối với cả hai tín hiệu. Do đó, trên hình 2.6 ta thấy, khi mức 1 của hai tín hiệu 1 và 2 xảy ra đồng thời, độ lợi của mỗi tín hiệu sẽ nhỏ hơn so với bình thường.

Hiện tượng xuyên âm phụ thuộc vào thời gian sống của điện tử ở trạng thái năng lượng cao. Nếu thời gian sống đủ lớn so với tốc độ dao động của công suất trong các tín hiệu vào, các điện tử không thể chuyển từ trạng thái năng lượng cao xuống trạng thái năng lượng thấp do sự dao động này. Do đó, không có xuyên âm xảy ra.

Đối với các SOA, thời gian sống này ở mức ns. Do đó, các điện tử dễ dàng

phản ứng lại sự dao động công suất của các tín hiệu được điều chế ở tốc độ Gb/s, dẫn đến một sự suy yếu hệ thống chính do xuyên âm. Ngược lại, thời gian sống phát xạ tự phát trong EDFA là khoảng 10ms. Do đó, xuyên âm chỉ có mặt nếu tốc độ điều chế của các tín hiệu vào thấp hơn vài kHz, điều này thường ít gặp trong thực tế. Do đó, EDFA phù hợp hơn khi được sử dụng trong các hệ thống WDM hơn SOA.

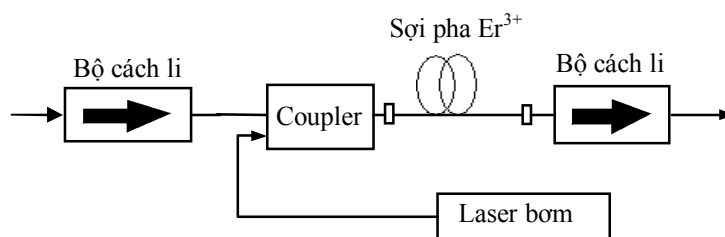
### 2.2.3 Ứng dụng của SOA

Với các đặc tính kỹ thuật trên, SOA có nhiều khuyết điểm so với EDFA khi được dùng làm khuếch đại quang. Do đó, cho dù SOA được nghiên cứu và chế tạo trước EDFA, nhưng SOA không được sử dụng làm bộ khuếch đại quang trong hệ thống WDM cũng như các hệ thống truyền dẫn quang khác hiện nay. Thay vào đó, dựa trên các hiệu ứng phi tuyến đáp ứng nhanh của SOA, SOA được dùng trong các ứng dụng khác của hệ thống thông tin quang như: bộ biến đổi bước sóng, khôi phục xung đồng hồ và các ứng dụng xử lý tín hiệu quang.

## 2.3 – KHUẾCH ĐẠI QUANG SỬ DỤNG SỢI PHA ERBIUM (EDFA)

### 2.3.1- Cấu trúc và nguyên lý khuếch đại tín hiệu

Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang sợi pha Erbium EDFA được minh họa trên hình 2.7. Trong đó bao gồm:



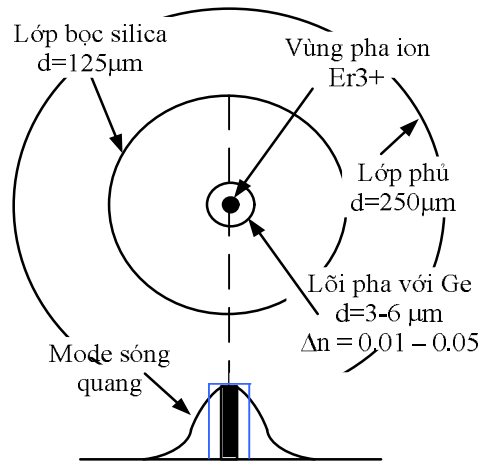
Hình 2.7 - Cấu trúc tổng quát của một bộ khuếch đại EDFA

#### 1) Sợi quang pha ion đất hiếm Erbium (EDF):

Là nơi xảy ra quá trình khuếch đại (vùng tích cực) của EDFA. Cấu tạo của sợi quang pha ion  $Er^{3+}$  được minh họa như trên hình 2.8.

Trong đó, vùng lõi trung tâm (có đường kính từ 3 -6  $\mu m$ ) của EDF được pha trộn ion  $Er^{3+}$  là nơi có cường độ sóng bơm và tín hiệu cao nhất. Việc pha các ion  $Er^{3+}$  trong vùng này nhằm tạo ra sự chồng lấn của năng lượng bơm và tín hiệu với các ion erbium lớn nhất dẫn đến khả năng khuếch đại tốt hơn. Lớp bọc có chiết suất thấp hơn bao quanh vùng lõi. Lớp vỏ bảo vệ bao quanh sợi quang tạo bán kính sợi quang tổng là 250  $\mu m$ . Lớp vỏ này có chiết suất lớn hơn so với lớp bọc dùng để loại bỏ bất kỳ ánh sáng không mong muốn nào lan truyền trong sợi quang. Nếu không

kể đến chất pha erbium, cấu trúc EDF giống như sợi đơn mode chuẩn trong viễn thông. Ngoài ra, EDF còn được chế tạo bằng các loại vật liệu khác như sợi thủy tinh fluoride hoặc sợi quang thủy tinh đa thành phần.



Hình 2.8 - Mặt cắt ngang của sợi quang pha ion Erbium

Giản đồ phân bố năng lượng của  $\text{Er}^{3+}$  trong sợi silica được minh họa trong hình 2.9. Theo đó, các ion  $\text{Er}^{3+}$  có thể tồn tại ở nhiều vùng năng lượng khác nhau được ký hiệu:  $^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{I}_{13/2}$ ,  $^4\text{I}_{11/2}$ ,  $^4\text{I}_{9/2}$ ,  $^4\text{F}_{9/2}$ ,  $^4\text{S}_{9/2}$ ,  $^2\text{H}_{11/2}$ . Trong đó,

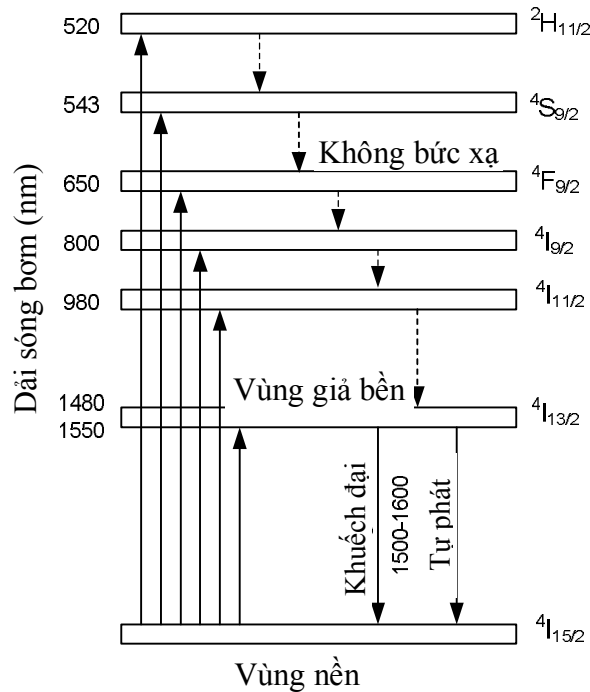
- Vùng  $^4\text{I}_{15/2}$  có mức năng lượng thấp nhất, được gọi là vùng nền.
- Vùng  $^4\text{I}_{13/2}$  được gọi là vùng giả bền vì các ion  $\text{Er}^{3+}$  có thời gian sống tại vùng này lâu (khoảng 10ms) trước khi chuyển xuống vùng nền. Thời gian sống này thay đổi tùy theo loại tạp chất được pha trong lõi của EDF.
- Vùng  $^4\text{I}_{11/2}$ ,  $^4\text{I}_{9/2}$ ,  $^4\text{F}_{9/2}$ ,  $^4\text{S}_{9/2}$ ,  $^2\text{H}_{11/2}$  là các vùng năng lượng cao, được gọi là vùng kích thích hay vùng bơm. Thời gian các ion  $\text{Er}^{3+}$  có trạng thái năng lượng trong các vùng này rất ngắn (khoảng 1  $\mu\text{s}$ ).

Sự chuyển đổi năng lượng của các ion  $\text{Er}^{3+}$  có thể xảy ra trong các trường hợp sau:

- Khi các ion  $\text{Er}^{3+}$  ở vùng nền nhận một mức năng lượng bằng độ chênh lệch năng lượng giữa vùng nền và vùng năng lượng cao hơn, chúng sẽ chuyển lên vùng có mức năng lượng cao hơn (sự hấp thụ năng lượng)
- Khi các ion  $\text{Er}^{3+}$  chuyển từ các vùng năng lượng cao xuống vùng năng lượng thấp hơn sẽ xảy ra hai trường hợp sau:

+ Phân rã không bức xạ: năng lượng được giải phóng dưới dạng **photon** tạo ra sự dao động phân tử trong sợi quang

+ Phát xạ ánh sáng: năng lượng được giải phóng dưới dạng photon.

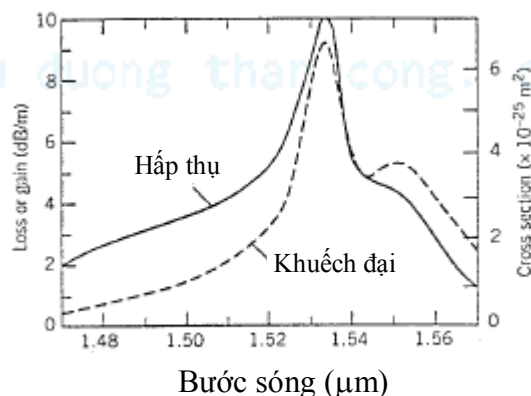


Hình 2.9- Giản đồ phân bố năng lượng của ion  $\text{Er}^{3+}$  trong sợi silica

Độ chênh lệch năng lượng giữa vùng giả bền ( $^4\text{I}_{13/2}$ ) và vùng nền ( $^4\text{I}_{15/2}$ ):

- 0.775eV (tương ứng với năng lượng của photon có bước sóng 1600nm) tính từ đáy vùng giả bền đến đỉnh của vùng nền
- 0.814eV (1527 nm) tính từ đáy vùng giả bền đến đáy của vùng nền
- 0.841 eV (1477nm) tính từ đỉnh vùng giả bền đến đáy của vùng nền

Mật độ phân bố năng lượng của các ion  $\text{Er}^{3+}$  trong vùng giả bền không đều nhau: các ion  $\text{Er}^{3+}$  có khuynh hướng tập trung nhiều ở các mức năng lượng thấp. Điều này dẫn đến khả năng hấp thụ và phát xạ photon của ion Erbium thay đổi theo bước sóng. Phổ hấp thụ và phổ khuếch đại của EDFA có lõi pha Ge được thể hiện tại hình 2.10.



Hình 2.10- Phổ hấp thụ và phổ khuếch đại của EDFA có lõi pha Ge

## 2) Laser bơm:

Cung cấp năng lượng ánh sáng để tạo ra trạng thái nghịch đảo nồng độ trong vùng tích cực. Laser bơm phát ra ánh sáng có bước sóng 980nm hoặc 1480nm.

## 3) WDM Coupler:

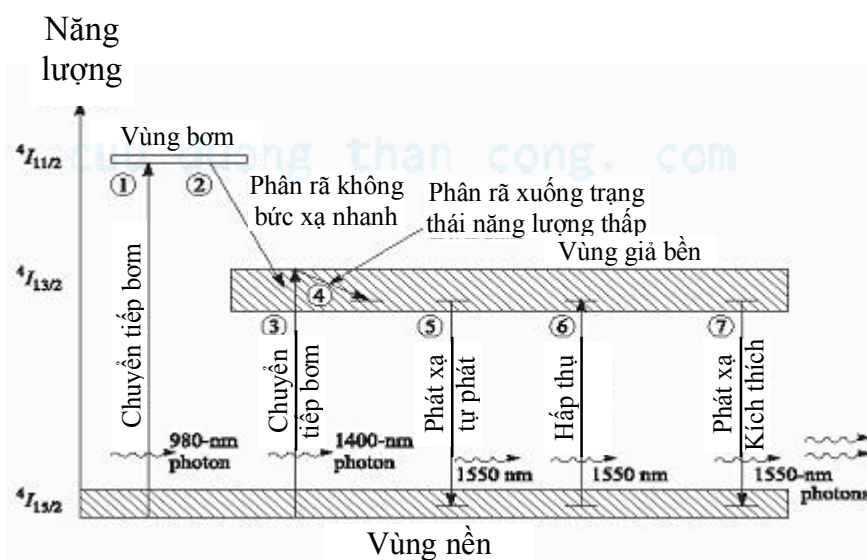
Ghép tín hiệu quang cần khuếch đại và ánh sáng từ laser bơm vào trong sợi quang. Loại coupler được sử dụng là WDM coupler cho phép ghép các tín hiệu có bước sóng 980/1550nm hoặc 1480/1550nm.

## 4) Bộ cách ly quang:

Ngăn không cho tín hiệu quang phản xạ ngược về phía đầu phát hoặc các tín hiệu quang trên đường truyền phản xạ ngược về EDFA.

Nguyên lý khuếch đại của EDFA được dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích.

Quá trình khuếch đại tín hiệu quang trong EDFA có thể được thực hiện theo các bước như sau (xem hình 2.11).



Hình 2.11 - Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra trong EDFA với hai bước sóng bơm 980 nm và 1480nm

Khi sử dụng nguồn bơm laser 980nm, các ion  $\text{Er}^{3+}$  ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng  $E_{\text{photon}} = 1.27\text{eV}$ ) và chuyển lên trạng thái năng lượng cao hơn ở vùng bơm (1).

Tại vùng bơm, các ion  $\text{Er}^{3+}$  phân rã không bức xạ rất nhanh (khoảng  $1\mu\text{s}$ ) và chuyển xuống vùng giả bền (2).

Khi sử dụng nguồn bơm laser 1480nm, các ion  $\text{Er}^{3+}$  ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng  $E_{\text{photon}} = 0.841\text{eV}$ ) và chuyển sang trạng thái năng lượng cao hơn ở đỉnh của vùng giả bền (3).

Các ion  $\text{Er}^{3+}$  trong vùng giả bền luôn có khuynh hướng chuyển xuống vùng năng lượng thấp (4).

Sau khoảng thời gian sống (khoảng 10ms), nếu không được kích thích bởi các photon có năng lượng thích hợp (phát xạ kích thích) các ion  $\text{Er}^{3+}$  sẽ chuyển sang trạng thái năng lượng thấp hơn ở vùng nền và phát xạ ra photon (phát xạ tự phát) (5).

Khi cho tín hiệu ánh sáng đi vào EDFA, sẽ xảy ra đồng thời hai hiện tượng sau:

- Các photon tín hiệu bị hấp thụ bởi các ion  $\text{Er}^{3+}$  ở vùng nền (6). Tín hiệu ánh sáng bị suy hao
- Các photon tín hiệu kích thích các ion  $\text{Er}^{3+}$  ở vùng giả bền (7). Hiện tượng phát xạ kích thích xảy ra. Khi đó, các ion  $\text{Er}^{3+}$  bị kích thích sẽ chuyển trạng thái năng lượng từ mức năng lượng cao ở vùng giả bền xuống mức năng lượng thấp ở vùng nền và phát xạ ra photon mới có cùng hướng truyền, cùng phân cực, cùng pha và cùng bước sóng. Tín hiệu ánh sáng được khuếch đại.

Độ rộng giữa vùng giả bền và vùng nền cho phép sự phát xạ kích thích xảy ra trong khoảng bước sóng 1530 nm – 1565nm. Đây cũng là vùng bước sóng hoạt động của EDFA. Độ lợi khuếch đại giảm nhanh chóng tại các bước sóng lớn hơn 1565 nm và bằng 0 dB tại bước sóng 1616 nm.

5)Yêu cầu đối với nguồn bơm:

a) Bước sóng bơm

Với các vùng năng lượng được nêu trong phần 2.3.1, ánh sáng bơm có thể được sử dụng tại các bước sóng khác nhau 650 nm ( $^4\text{F}_{9/2}$ ), 800 nm ( $^4\text{I}_{9/2}$ ), 980 nm ( $^4\text{I}_{11/2}$ ), 1480 nm ( $^4\text{I}_{13/2}$ ). Tuy nhiên, khi bước sóng bơm càng ngắn thì các ion  $\text{Er}^{3+}$  phải trải qua nhiều giai đoạn chuyển đổi năng lượng trước khi trở về vùng nền và phát xạ ra photon ánh sáng. Do đó, hiệu suất bơm không cao, năng lượng bơm sẽ bị tổn hao. Vì vậy, trên thực tế, ánh sáng bơm sử dụng cho EDFA chỉ được sử dụng tại hai bước sóng 980nm và 1480nm.

Trong EDFA, điều kiện để có khuếch đại tín hiệu là đạt được sự nghịch đảo nồng độ bằng cách sử dụng nguồn bơm để bơm các ion erbium lên trạng thái kích thích. Có hai cách thực hiện quá trình này: bơm trực tiếp tại bước sóng 1480 nm hoặc bơm gián tiếp tại bước sóng 980 nm.

- Phương pháp bơm gián tiếp (bơm ở 980 nm): trong trường hợp này, ion erbium liên tục được chuyển tiếp từ vùng năng lượng  $^4\text{I}_{15/2}$  thấp lên vùng năng lượng cao  $^4\text{I}_{11/2}$ , sau đó các ion sẽ phân rã xuống vùng  $^4\text{I}_{13/2}$  nhưng không phát xạ. Từ vùng này,

khi có ánh sáng kích thích thì các ion sẽ phát xạ bước sóng mong muốn (từ 1550 đến 1600 nm) khi chuyển từ vùng năng lượng  $^4I_{13/2}$  xuống vùng  $^4I_{15/2}$ . Đây chính là hệ thống ba mức. Thời gian sống của ion erbium ở mức  $^4I_{11/2}$  khoảng  $1\mu s$  trong khi ở  $^4I_{13/2}$  thì tới 10ms. Với thời gian sống dài, vùng  $^4I_{15/2}$  được gọi là vùng ổn định. Vì vậy, các ion được bơm lên mức cao, sau đó nhanh chóng xuống vùng  $^4I_{13/2}$  và tồn tại ở đó trong một khoảng thời gian tương đối dài tạo nên sự nghịch đảo về nồng độ.

- Với phương pháp bơm trực tiếp (1480 nm): các ion erbium chỉ hoạt động trong hai vùng năng lượng  $^4I_{13/2}$  và  $^4I_{15/2}$ . Đây là hệ thống 2 mức. Các ion erbium liên tục được chuyển từ vùng năng lượng nền  $^4I_{15/2}$  lên vùng năng lượng kích thích  $^4I_{13/2}$  nhờ năng lượng bơm. Vì thời gian tồn tại ở mức này dài nên chúng tích lũy tại đây tạo ra sự nghịch đảo nồng độ.

Nguồn bơm có hiệu quả cao ở cả hai bước sóng 980 và 1480 nm. Để có hệ số khuếch đại hơn 20 dB thì chỉ cần tạo ra nguồn bơm có công suất nhỏ hơn 5 mW, nhưng vẫn cần phải có nguồn bơm từ 10 đến 100 mW để đảm bảo cho công suất ra đủ lớn.

Chỉ số nhiễu lượng tử giới hạn là 3 dB đạt được ở bước sóng 980 nm. Đối với bước sóng 1480 nm thì chỉ số nhiễu là vào khoảng 4 dB vì tiết diện ngang phát xạ tại 1480 nm cao hơn tại 980 nm và sự bức xạ kích thích do nguồn bơm đã giới hạn sự nghịch đảo tích lũy tại 1480nm. Do đó, bước sóng bơm 980 nm được ứng dụng cho các bộ khuếch đại tạp âm thấp. Hệ số khuếch đại tại bước sóng bơm 980 nm cao hơn tại 1480 nm tại cùng công suất bơm. Do đó, để đạt được cùng một hệ số khuếch đại thì công suất bơm tại 1480 nm phải cao hơn tại 980 nm. Vì công suất bơm ở 1480 nm lớn hơn nên công suất đầu ra lớn hơn, do đó bơm ở bước sóng 1480nm được ứng dụng cho các bộ khuếch đại công suất. Ngoài ra, bước sóng bơm 1480 nm được truyền trong sợi quang với suy hao thấp. Do đó, nguồn bơm laser có thể đặt xa bộ khuếch đại.

Hiện nay, bơm bước sóng 1480 nm được sử dụng rộng rãi hơn vì chúng sẵn có hơn và độ tin cậy cao hơn. Độ tin cậy là đặc điểm quan trọng đối với laser bơm vì nó dùng để bơm cho khoảng cách dài và để tránh làm nhiễu tín hiệu. Các thiết bị khuếch đại công suất đòi hỏi công suất bơm cao nhất và độ ổn định của chúng là mấu chốt trong quá trình nghiên cứu phát triển chúng. Nếu tăng được độ ổn định của laser có bước sóng 980 nm thì có thể chúng sẽ được chọn làm nguồn bơm. Một số EDFA được bơm tại cả hai bước sóng để tận dụng ưu điểm của cả hai bước sóng.

#### *b) Công suất bơm*

Công suất bơm càng lớn thì sẽ có nhiều ion erbium bị kích thích để trao đổi năng lượng với tín hiệu cần khuếch đại và sẽ làm cho hệ số khuếch đại tăng lên. Tuy nhiên, hệ số khuếch đại không thể tăng mãi theo công suất bơm vì số lượng các ion erbium được cấy vào sợi là có giới hạn. Ngoài ra, khi công suất bơm tăng lên thì

hệ số nhiễu sẽ giảm. Điều này sẽ được trình bày trong phần tính hệ số nhiễu của EDFA.

### c) Hướng bơm

Bộ khuếch đại EDFA có thể được bơm theo ba cách:

Bơm thuận: nguồn bơm được bơm cùng chiều với hướng truyền tín hiệu.

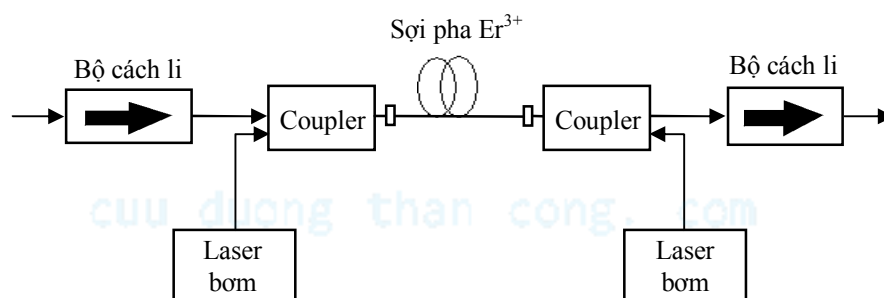
Bơm ngược : nguồn bơm được bơm ngược chiều với hướng truyền tín hiệu.

Bơm hai chiều: sử dụng hai nguồn bơm và được theo hai chiều ngược nhau .

Hướng bơm thuận có ưu điểm nhiễu thấp vì nhiễu khá nhạy cảm với hệ số khuếch đại mà hệ số khuếch đại tín hiệu cao nhất khi công suất tín hiệu vào thấp nhất. Trong khi đó, hướng bơm ngược cung cấp công suất ra bão hoà cao nhưng có hệ số nhiễu cao hơn bơm thuận.

Do vậy, khuyến nghị sử dụng cả hai laser bơm có bước sóng bơm khác nhau. Việc bơm tại bước sóng 1480 nm thường được sử dụng theo chiều ngược với hướng truyền tín hiệu và bơm tại 980 nm theo hướng thuận để sử dụng tốt nhất ưu điểm của mỗi loại bơm. Bơm tại 1480 nm có hiệu suất lượng tử cao hơn nhưng có hệ số nhiễu cao hơn, trong khi bơm tại bước sóng 980 nm có thể cung cấp một hệ số nhiễu gần mức giới hạn lượng tử. Hệ số nhiễu thấp phù hợp cho các ứng dụng tiền khuếch đại.

Một EDFA được bơm bởi một nguồn bơm có thể cung cấp công suất đầu ra cực đại khoảng +16 dBm trong vùng bão hoà hoặc hệ số nhiễu từ 5-6 dB trong vùng tín hiệu nhỏ. Cả hai bước sóng bơm được sử dụng đồng thời có thể cung cấp công suất đầu ra cao hơn; một EDFA được bơm kép có thể cung cấp công suất ra tới +26 dBm trong vùng công suất bơm cao nhất có thể đạt được. Hình 2.12 thể hiện một EDFA được bơm hai chiều.



Hình 2.12 - Cấu hình bộ khuếch đại EDFA bơm hai chiều

## 2.3.2 Các tham số

### 1) Phổ khuếch đại

Phổ khuếch đại của EDFA được trình bày trong hình 2.10 là tính chất quan trọng nhất của EDFA khi xác định các kênh tín hiệu được khuếch đại trong hệ thống WDM. Hình dạng của phổ khuếch đại phụ thuộc vào bản chất của sợi quang, loại tạp chất (Ge, Al) và nồng độ tạp chất được pha trong lõi của sợi quang.

Hình 2.10 cho thấy phổ khuếch đại của EDFA có lõi pha Ge khá rộng. Tuy nhiên, phổ khuếch đại này không bằng phẳng. Điều này sẽ dẫn đến việc hệ số khuếch đại khác nhau đối với các bước sóng khác nhau. Nếu hệ số khuếch đại của các kênh tín hiệu không đồng nhất, nhất là sau khi qua nhiều tầng EDFA, sai số hệ số khuếch đại này sẽ tích lũy tuyến tính đến mức khi tới đầu thu kênh bước sóng có hệ số khuếch đại lớn làm cho đầu vào máy thu quá tải. Ngược lại, kênh tín hiệu có hệ số khuếch đại nhỏ thì tỉ số SNR không đạt yêu cầu. Sự làm phẳng hệ số khuếch đại là cần thiết để loại bỏ sự khuếch đại méo các tín hiệu qua các EDFA đường truyền ghép tầng.

Một số biện pháp được sử dụng để khắc phục sự không bằng phẳng của phổ khuếch đại:

- Chọn lựa các bước sóng có hệ số khuếch đại gần bằng nhau. WDM làm việc ở dải sóng băng C (1530 nm ÷ 1565 nm). Trong dải bước sóng này chọn 40 bước sóng làm bước sóng công tác của WDM. Các bước sóng này có hệ số khuếch đại gần bằng nhau.
- Công nghệ cân bằng hệ số khuếch đại: dùng bộ cân bằng hấp thụ bớt công suất ở bước sóng có hệ số khuếch đại lớn và dùng bộ khuếch đại để tăng công suất của bước sóng có hệ số khuếch đại nhỏ.
- Thay đổi thành phần trộn trong sợi quang: dùng sợi quang trộn thêm nhôm, photpho nhôm hay flo cùng với erbium sẽ tạo nên bộ khuếch đại có băng tần được mở rộng và phổ khuếch đại bằng phẳng hơn.

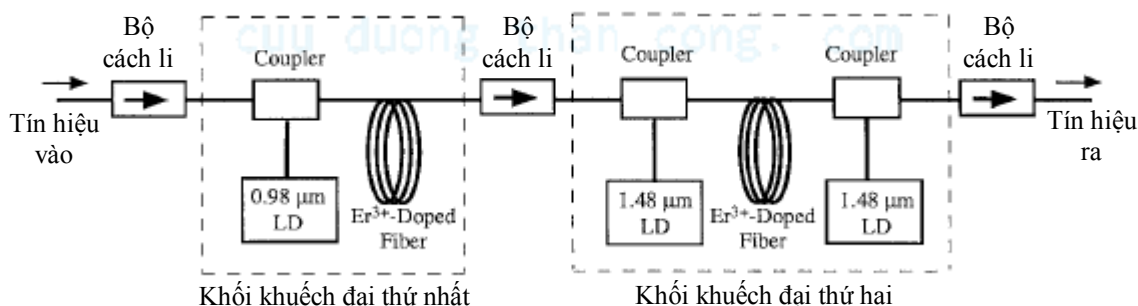
Ngoài ra, phổ khuếch đại của EDFA còn phụ thuộc vào chiều dài của sợi EDF. Lý do là vì trạng thái nghịch đảo nồng độ thay đổi dọc theo chiều dài của sợi quang khi công suất bơm thay đổi.

Bộ khuếch đại EDFA hoạt động ở băng C (1530 nm ÷ 1565 nm). Tuy nhiên, hệ số khuếch đại của sợi pha có đuôi trải rộng đến khoảng 1605 nm. Điều này kích thích sự phát triển của các hệ thống hoạt động ở băng L từ 1565 nm đến 1625 nm. Nguyên lý hoạt động của EDFA băng L giống như EDFA băng C. Tuy nhiên, có sự khác nhau trong việc thiết kế EDFA cho băng C và băng L. Các phần tử bên trong bộ khuếch đại quang như bộ cách ly và coupler phụ thuộc vào bước sóng nên chúng sẽ khác nhau trong băng C và băng L. Sự so sánh các tính chất của EDFA trong băng C và băng L được thể hiện trong bảng 2.2.

Bảng 2.2: Bảng so sánh EDFA hoạt động trong băng C và băng L

Các thông số	Băng C	Băng L
Hệ số khuếch đại	Cao hơn	Nhỏ hơn khoảng 3 lần
Phổ khuếch đại	Ít bằng phẳng hơn	Bằng phẳng hơn
Nhiều ASE	Thấp hơn	Cao hơn

Hình 2.13 trình bày cấu trúc của một bộ khuếch đại băng L làm bằng phẳng hệ số khuếch đại trong khoảng bước sóng 1570nm ÷ 1610nm với thiết kế hai tầng. Tầng đầu tiên được bơm ở bước sóng 980nm và hoạt động như một bộ EDFA truyền thống (sợi quang dài 20 nm ÷ 30 nm) có khả năng cung cấp hệ số khuếch đại trong khoảng bước sóng 1530 nm ÷ 1570 nm. Ngược lại, tầng thứ hai có sợi quang dài 200m và được bơm hai chiều sử dụng laser 1480nm. Một bộ cách ly được đặt giữa hai tầng này cho phép nhiễu ASE truyền từ tầng thứ 1 sang tầng thứ 2 nhưng ngăn ASE truyền ngược về tầng thứ nhất. Với cấu trúc nối tiếp như vậy, khuếch đại hai tầng có thể cung cấp hệ số khuếch đại phẳng trên dải băng thông rộng trong khi vẫn duy trì mức nhiễu thấp.



Hình 2.13 - Cấu hình của một bộ khuếch đại băng L hai tầng làm bằng phẳng hệ số khuếch đại trong dải bước sóng 1570nm ÷ 1610nm

## 2) Hệ số khuếch đại

Hệ số khuếch đại của một bộ EDFA có thể được tính theo biểu thức sau:

$$G = \exp \left[ \int_0^L (N_2(z)\sigma_s^{(e)} - N_1(z)\sigma_s^{(a)}) \Gamma_s dz \right] \quad (2.12)$$

trong đó:

- $N_2(z)$ ,  $N_1(z)$ : mật độ ion erbium ở trạng thái kích thích và ở trạng thái nền tại vị trí  $z$  trong đoạn sợi quang pha erbium.
- $L$ : chiều dài sợi pha erbium.

- $\sigma_s^{(e)}, \sigma_s^{(a)}$ : tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ của ion erbium tại bước sóng tín hiệu.

Biểu thức (2.12) cho thấy hệ số khuếch đại liên quan đến sự nghịch đảo nồng độ trung bình. Gọi  $\overline{N}_1, \overline{N}_2$  lần lượt là nồng độ ion erbium ở mức năng lượng nền và mức năng lượng kích thích trung bình. Khi đó  $\overline{N}_1, \overline{N}_2$  sẽ được tính theo các biểu thức sau:

$$\overline{N}_1 = \frac{1}{L} \int_0^L N_1(z) dz \quad (2.13)$$

$$\overline{N}_2 = \frac{1}{L} \int_0^L N_2(z) dz \quad (2.14)$$

Biểu thức (2.12) có thể được viết lại một cách đơn giản hơn như sau:

$$G = \exp[(\overline{N}_2 \sigma_s^{(e)} - \overline{N}_1 \sigma_s^{(a)}) \Gamma_s L] \quad (2.15)$$

Từ biểu thức (2.15) thấy rằng hệ số khuếch đại tín hiệu sau khi đi qua sợi quang chỉ phụ thuộc vào nghịch đảo nồng độ các ion erbium trung bình trong sợi quang mà không phụ thuộc vào chi tiết về dạng nghịch đảo như một hàm đối với vị trí dọc theo chiều dài sợi quang. Trong biểu thức (2.15) hai tham số  $N_1(z)$  và  $N_2(z)$  là hàm của vị trí  $z$  dọc theo sợi quang được cho bởi:

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau \sigma_s^{(a)} \Gamma_s}{h f_s A} P_s(z) + \frac{\tau \sigma_p^{(a)} \Gamma_p}{h f_p A} P_p(z)}{\frac{\tau (\sigma_s^{(a)} + \sigma_s^{(e)}) \Gamma_s}{h f_s A} P_s(z) + \frac{\tau (\sigma_p^{(a)} + \sigma_p^{(e)}) \Gamma_p}{h f_p A} P_p(z)} N \quad (2.16)$$

$$N_1(z) = N - N_2(z) \quad (2.17)$$

trong đó:

- $\tau$ : thời gian sống của ion erbium ở trạng thái kích thích  $^4I_{13/2}$ .
- $P_s(z)$ : công suất của tín hiệu tại vị trí  $z$  trong sợi quang.
- $P_p(z)$ : công suất bơm tại vị trí  $z$  trong sợi quang.
- $\Gamma_s$ : hệ số chồng lấn tại bước sóng tín hiệu.
- $\Gamma_p$ : hệ số chồng lấn tại bước sóng bơm.
- $A$ : diện tích tiết diện ngang hiệu dụng.
- $f_s$ : tần số tín hiệu.
- $f_p$ : tần số bơm.
- $N$ : mật độ ion erbium tổng cộng.
- $\sigma_s^{(a)}, \sigma_s^{(e)}$ : tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ tại bước sóng tín hiệu.

- $\sigma_p^{(a)}, \sigma_p^{(e)}$ : tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ tại bước sóng bơm.
- h: hằng số Planck;  $h = 6,625.10^{-34}$  J.s.

Từ biểu thức (2.15) ta thấy hệ số khuếch đại của EDFA phụ thuộc vào các yếu tố sau:

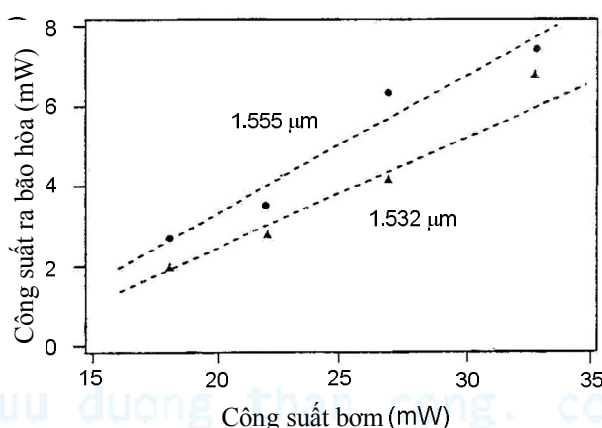
- Phụ thuộc vào nồng độ ion  $Er^{+3}$ : khi nồng độ  $Er^{+3}$  trong sợi quang của bộ EDFA tăng thì khả năng chúng được chuyển lên mức năng lượng cao hơn càng nhiều, do đó hệ số khuếch đại tăng. Nhưng nếu nồng độ  $Er^{+3}$  tăng quá cao sẽ gây tích tụ dẫn đến hiện tượng tiêu hao quang làm cho hệ số khuếch đại giảm.
- Phụ thuộc vào công suất tín hiệu tới và công suất bơm quang: khi công suất vào tăng, bức xạ bị kích tăng nhanh, nghĩa là ion  $Er^{+3}$  ở mức năng lượng cao trở về mức năng lượng cơ bản càng nhiều làm giảm nồng độ số ion  $Er^{+3}$  ở mức năng lượng cao, làm yếu đi khả năng bức xạ của ion  $Er^{+3}$  khi tín hiệu quang được đưa tới, do đó hệ số khuếch đại giảm. Sẽ có một mức giới hạn mà công suất tín hiệu vào tăng nhưng công suất ra không tăng nữa gọi là công suất bão hoà.
- Phụ thuộc vào chiều dài sợi: khi chiều dài sợi ngắn thì tín hiệu không được khuếch đại nhiều do đó hệ số khuếch đại tín hiệu nhỏ. Ngược lại, khi chiều dài tăng lên thì tín hiệu được khuếch đại nhiều hơn, do đó hệ số khuếch đại lớn hơn. Tuy nhiên, khi chiều dài vượt quá khả năng công suất bơm thì hệ số khuếch đại tín hiệu sẽ bị giảm do chiều dài quá lớn mà công suất bơm lại không đáp ứng hết chiều dài sợi thì tín hiệu sẽ bị suy hao dần và do đó làm giảm hệ số khuếch đại.
- Phụ thuộc vào công suất bơm: công suất bơm càng lớn thì sẽ có nhiều ion erbium bị kích thích để trao đổi năng lượng với tín hiệu cần khuếch đại và sẽ làm cho hệ số khuếch đại tăng lên. Tuy nhiên, hệ số khuếch đại không thể tăng mãi theo công suất bơm vì số lượng các ion erbium được cấy vào sợi là có giới hạn.

### 3) Công suất ra bão hoà

Sự bão hoà xảy ra khi công suất tín hiệu vào EDFA lớn gây ra sự giảm hệ số khuếch đại. Vì vậy, nó giới hạn công suất ra của bộ khuếch đại. Sự bão hoà hệ số khuếch đại này xuất hiện khi công suất tín hiệu tăng cao và gây ra sự phát xạ kích thích ở một tỷ lệ cao và do đó làm giảm sự nghịch đảo nồng độ. Điều đó có nghĩa là số các ion erbium ở trạng thái kích thích giảm một cách đáng kể. Vì vậy, công suất tín hiệu ở đầu ra bị hạn chế bởi sự bão hoà công suất. Công suất ra bão hoà  $P_{out, sat}$  được định nghĩa là tín hiệu ra mà ở đó hệ số khuếch đại bị giảm đi 3 dB so với khi khuếch đại tín hiệu nhỏ.

Công suất ra bão hoà không phải là một hằng số mà tăng tuyến tính với công suất bơm. Công suất bão hoà có thể được xác định bởi công suất tín hiệu đầu ra mà tại đó hệ số khuếch đại bằng hệ số khuếch đại tín hiệu nhỏ trừ 3 dB. Như vậy bằng cách xác định hệ số khuếch đại tín hiệu nhỏ ta có thể suy ra điểm bão hoà và từ đó xác định công suất ra bão hoà.

Công suất ra bão hoà cũng thay đổi tùy theo bước sóng của tín hiệu, vì mật độ các ion  $\text{Er}^{3+}$  phân bố tại vùng năng lượng giả bền không bằng nhau. Hình 2.14 còn cho biết công suất ra bão hoà tại 1.55  $\mu\text{m}$  cao hơn tại 1.53  $\mu\text{m}$  với cùng công suất bơm.



Hình 2.14- Đồ thị biểu diễn công suất ra bão hoà tăng tuyến tính theo công suất bơm vào tại bước sóng bơm 975 nm đối với bước sóng tín hiệu là 1555 nm và 1532 nm.

#### 4) Nhiều trong bộ khuếch đại

Nhiều trong bộ khuếch đại là một yếu tố giới hạn quan trọng đối với hệ thống truyền dẫn. Đối với EDFA, ảnh hưởng của nhiễu ASE được tính thông qua thông số hệ số nhiễu NF được cho bởi công thức :

$$NF = 2n_{sp} \quad (2.18)$$

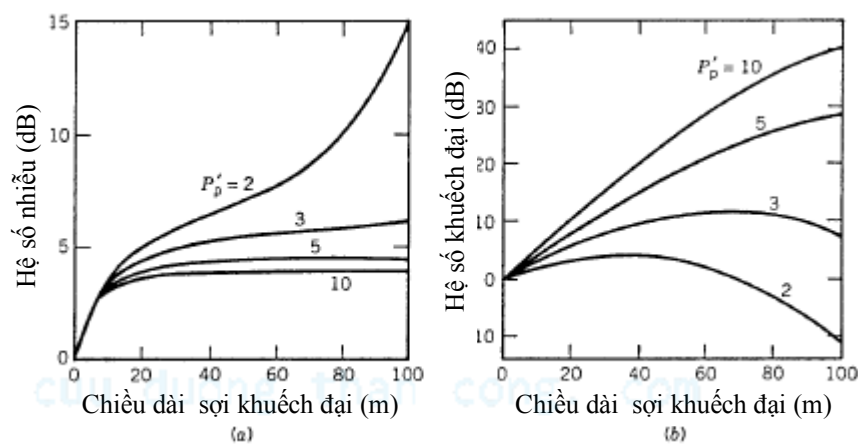
trong đó,  $n_{sp} = N_2/(N_2 - N_1)$  được gọi là hệ số phát xạ tự phát,  $N_1$ ,  $N_2$  là nồng độ ion erbium ở mức năng lượng nền và mức năng lượng kích thích.

Như đã trình bày trong các công thức (2.16) và (2.17),  $N_1$ ,  $N_2$  thay đổi dọc theo chiều dài của sợi quang và phụ thuộc vào công suất của nguồn bơm và công suất của tín hiệu. Do đó, hệ số nhiễu NF của EDFA cũng phụ thuộc vào chiều dài của sợi quang  $L$  và công suất bơm  $P_p$ , giống như hệ số khuếch đại tín hiệu của EDFA.

Hình 2.15 biểu diễn sự thay đổi của NF và hệ số khuếch đại tín hiệu theo chiều dài của sợi quang với một số giá trị của  $P_p/P_{sat}$  khi công suất tín hiệu đầu vào

1mW tại bước sóng 1,53  $\mu\text{m}$ . Kết quả cho thấy rằng NF có thể đạt gần bằng 3dB khi công suất của nguồn bơm  $P_P \gg P_{p,\text{sat}}$ .

Với mức nhiễu tương đối thấp, EDFA là sự lựa chọn lý tưởng cho các hệ thống thông tin quang WDM hiện nay. Dù vậy, nhiễu do bộ khuếch đại cũng làm giới hạn chất lượng các hệ thống thông tin quang đường dài sử dụng nhiều bộ khuếch đại EDFA. Vấn đề nhiễu trở nên nghiêm trọng khi hệ thống hoạt động trong vùng tán sắc zero của sợi quang. Khi đó các hiệu ứng phi tuyến sẽ làm tăng nhiễu bộ khuếch đại và giảm phổ tín hiệu. Ngoài ra, nhiễu của bộ khuếch đại cũng gây nên rung pha định thời. Vấn đề này sẽ được trình ở phần sau.



Hình 2.15- (a) Hệ số nhiễu NF và (b) Hệ số khuếch đại của EDFA khi chiều dài sợi quang thay đổi tại một số giá trị của công suất bơm  $P_P/P_{\text{sat}}$

Nhiều ASE không chỉ giới hạn tỉ lệ SNR trong các hệ thống sử dụng các bộ khuếch đại quang, mà còn đặt ra những giới hạn khác đối với các ứng dụng khác nhau của các bộ khuếch đại quang trong các tuyến thông tin sợi quang. Chẳng hạn, xem xét một vài bộ khuếch đại quang được ghép tầng dọc theo một khoảng truyền dẫn như các bộ lặp tuyến tính để bù suy hao sợi quang. Công suất nhiễu ASE  $P_{\text{noise}}$  sẽ là một phần trong công suất đầu ra  $P_{\text{out}}$  của một bộ khuếch đại nào đó trong chuỗi khuếch đại và trở thành đầu vào của bộ khuếch đại tiếp theo. Do đó  $P_{\text{noise}}$  có thể được khuếch đại bởi các bộ khuếch đại tiếp theo. Do sự bão hoà hệ số khuếch đại phụ thuộc vào tổng công suất đầu vào, nhiễu ASE từ đầu ra của các tầng trước trong chuỗi khuếch đại có thể lớn đến mức nó sẽ làm bão hoà các bộ khuếch đại phía sau. Nếu sự phản xạ tại đầu ra và đầu vào của bộ khuếch đại thấp, ASE được phát xạ theo hướng ngược về đầu vào từ các bộ khuếch đại thuộc các tầng sau cũng có thể đi vào các bộ khuếch đại ở phía trước, càng làm tăng sự bão hoà gây ra do ASE.

Với các bộ khuếch đại quang sợi, sự tạo thành nhiễu ASE này có thể dẫn đến sự tự dao động dọc theo tuyến truyền dẫn của sợi quang và do đó sự phản xạ có mặt

dọc theo đường truyền. Mặc dù sự phản xạ như vậy là nhỏ, trong một khoảng truyền dài với một số lượng lớn các bộ khuếch đại như các bộ lặp tuyến tính, công suất ASE tích tụ dọc theo chuỗi khuếch đại kích hoạt sự dao động. Để tối thiểu hoá ảnh hưởng này, các bộ cách ly quang có thể được nối dọc theo liên kết sợi quang để giảm ASE hướng ngược, nhưng điều này sẽ ngăn cản hệ thống được sử dụng cho truyền dẫn song hướng.

Thêm vào sự suy giảm hoạt động về mặt công suất, sự hỗn tạp về pha của tín hiệu do phát xạ tự phát cũng gây ảnh hưởng như nhiễu tần số và nhiễu biên độ, đặc biệt là nhiễu pha do sự phản xạ tại các giao diện quang. Vì tín hiệu tới bộ khuếch đại quang cũng có một lượng nhiễu pha do sự trải rộng phổ của nguồn laser càng làm tăng nhiễu trong bộ khuếch đại. Điều này sẽ làm suy giảm hoạt động của các hệ thống thông tin quang.

### **2.3.3- Ứng dụng của EDFA**

Trong phần này trước hết cần xem xét việc sử dụng bộ tiền khuếch đại EDFA tại đầu thu và tập trung vào thiết kế đối với các hệ thống cự ly dài khi sử dụng một chuỗi các bộ khuếch đại quang.

Các bộ khuếch đại quang được sử dụng để cải thiện độ nhạy của máy thu quang nhờ khuếch đại trước tín hiệu quang làm cho nó đủ mạnh và có thể bỏ qua nhiễu nhiệt so với nhiễu phát sinh do bộ tiền khuếch đại. Kết quả là độ nhạy của máy thu được cải thiện 10 dB ÷ 20 dB khi sử dụng bộ tiền khuếch đại EDFA. Trong năm 1990 đã thí nghiệm đạt kết quả là chỉ cần 152 photon/bit cho hệ thống quang hoạt động tại tốc độ bit (0,6 ÷ 2,5) Gbit/s. Trong một thí nghiệm khác, độ nhạy máy thu – 37,2 dBm (147 photon/ bit) đã được thực hiện tại tốc độ bit 10 Gbit/s. Có khả năng sử dụng hai bộ tiền khuếch đại nối tiếp nhau; độ nhạy máy thu được cải thiện 18,8 dB nhờ kỹ thuật này. Thực nghiệm vào năm 1992 đã đạt được độ nhạy kỷ lục - 38,8 dBm (102 photon/ bit) tại 10 Gbit/s khi sử dụng hai EDFA. Giảm độ nhạy bị hạn chế thấp hơn 1,2 dB khi tín hiệu được truyền trên 45 km trên sợi dịch tán sắc.

Tính độ nhạy máy thu cần bao gồm tất cả các nguồn nhiễu dòng tại máy thu. Tính năng quan trọng nhất khởi đầu khi thiết kế bộ tiền khuếch đại quang là ảnh hưởng của ASE đến tín hiệu. Do sự kết hợp tự nhiên của phát xạ tự phát, tín hiệu được khuếch đại bị nhiễu hơn tín hiệu vào. Dòng được tạo ra tại diode tách quang có thể được viết dưới dạng:

$$I = R \left| \sqrt{G} E_s + E_{sp} \right|^2 + i_s + i_T \quad (2.19)$$

trong đó R là đáp ứng của diode tách quang, G là hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại,  $E_s$  là trường tín hiệu,  $E_{sp}$  là trường quang kết hợp với ASE,  $i_s$  và  $i_T$  là dòng

thăng dăng phát sinh bởi nhiễu nơ và nhiễu nhiệt trong máy thu. Trị số trung bình của dòng nhiễu bao gồm:

$$\bar{I} = R(GP_s + P_{sp}) \quad (2.20)$$

trong đó  $P_s = |E_s|^2$  là tín hiệu quang đầu vào bộ tiền khuếch đại và  $P_{sp}$  là công suất nhiễu ASE bổ sung vào tín hiệu có biên độ là:

$$P_{sp} = |E_{sp}|^2 = S_{sp} \Delta \nu_{sp} \quad (2.21)$$

$S_{sp}$  là mật độ phổ và  $\Delta \nu_{sp}$  là độ rộng băng tần hiệu dụng của phát xạ tự phát nằm trong băng tần bộ khuếch đại hoặc băng tần bộ lọc nếu bộ lọc quang đặt sau bộ khuếch đại. Chú ý rằng  $E_{sp}$  trong biểu thức (2.19) bao gồm chỉ ASE có phân cực trực giao với tín hiệu nên không thể phách với tín hiệu.

Nhiều dòng  $\Delta I$  bao gồm thăng giáng bắt nguồn từ nhiễu nơ, nhiễu nhiệt và nhiễu ASE. Nhiều dòng ASE có nguồn gốc từ phách giữa  $E_s$  và  $E_{sp}$  và phách của ASE với chính nó. Để hiểu khái niệm phách này rõ hơn, chú ý rằng ASE có điện trường  $E_{sp}$  là băng tần rộng và có thể viết dưới dạng:

$$E_{sp} = \int \sqrt{S_{sp}} \exp(\phi_n - i\omega_n t) d\omega_n \quad (2.22)$$

trong đó  $\phi_n$  là pha của thành phần phổ nhiễu tại tần số  $\omega_n$  và tích phân mở rộng trên toàn bộ băng tần của bộ khuếch đại (hoặc bộ lọc). Khi sử dụng  $E_s = \sqrt{P_s} \exp(\phi_s - i\omega_s t)$  thành phần giao thoa trong biểu thức (2.19) bao gồm hai bộ phận và dẫn tới thăng dăng dòng dưới dạng:

$$i_{sig-sp} = 2R \int (GP_s S_{sp})^{1/2} \cos \theta_1 d\omega_n, i_{sp-sp} = \iint S_{sp} \cos \theta_2 d\omega_n d\omega'_n \quad (2.23)$$

trong đó  $\theta_1 = (\omega_s - \omega_n)t + \phi_n - \phi_s$  và  $\theta_2 = (\omega_n - \omega'_n)t + \phi'_n - \phi_n$  là hai pha ngẫu nhiên thay đổi nhanh. Hai pha này đóng góp vào nhiễu dòng là do phách của  $E_s$  với  $E_{sp}$  và phách của  $E_{sp}$  với chính nó. Lấy trung bình theo pha ngẫu nhiên, phương sai tổng  $\sigma^2 = \langle (\Delta I)^2 \rangle$  của thăng dăng dòng có thể viết:

$$\sigma^2 = \sigma_T^2 + \sigma_s^2 + \sigma_{sig-sp}^2 + \sigma_{sp-sp}^2 \quad (2.24)$$

trong đó  $\sigma_T^2$  đặc trưng cho nhiễu nhiệt và các số hạng còn lại là:

$$\sigma_s^2 = 2q[R(GP_s + P_{sp})] \Delta f \quad (2.25)$$

$$\sigma_{sig-sp}^2 = 4R^2 GP_s S_{sp} \Delta f \quad (2.26)$$

$$\sigma_{sp-sp}^2 = 4R^2 S_{sp}^2 \Delta \nu_{opt} \Delta f \quad (2.27)$$

trong đó  $\Delta\nu_{opt}$  là độ rộng băng tần của bộ lọc quang và  $\Delta f$  là độ rộng băng tần điện của nhiều máy thu.

BER có thể có được xác định nhờ biểu thức:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(Q / \sqrt{2}) \quad (2.28)$$

với tham số Q được xác định theo biểu thức sau:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{RG(2\bar{P}_{rec})}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.29)$$

Biểu thức (2.29) có được là nhờ giả thiết tỷ số phân biệt bằng không ( $I_0 = 0$ ) sao cho  $I_1 = RGP_1 = RG(2\bar{P}_{rec})$  với  $\bar{P}_{rec}$  là độ nhạy máy thu đối với giá trị BER cho trước ( $Q = 6 \text{ khi } BER = 10^{-9}$ ). Dòng nhiễu RMS  $\sigma_1$  và  $\sigma_0$  có được từ các biểu thức (2.24) đến (2.29) nhờ đặt  $P_s = P_1 = 2\bar{P}_{rec}$  và  $P_s = 0$  tương ứng.

Phân tích có thể được xem xét một cách đơn giản nhờ so sánh biên độ các số hạng khác nhau trong biểu thức (2.23). Nhằm mục đích này, sử dụng  $R = \eta q / h\nu$  và viết các biểu thức (2.24) – (2.26) dưới dạng hệ số nhiễu  $F_n$  của bộ khuếch đại:

$$\sigma_s^2 = 2p^2 \eta GP_s \Delta f / h\nu \quad (2.30)$$

$$\sigma_{sig-sp}^2 = 2(q\eta G)^2 F_n P_s \Delta f / h\nu \quad (2.31)$$

$$\sigma_{sp-sp}^2 = (q\eta GF_n)^2 \Delta\nu_{opt} \Delta f \quad (2.32)$$

trong đó  $RP_s$  được bỏ qua trong biểu thức (2.25) vì đóng góp của nhiễu nỗ được bỏ qua. So sánh biểu thức (2.30) với (2.31) chỉ ra rằng  $\sigma_s^2$  có thể bỏ qua khi so sánh với  $\sigma_{sig-sp}^2$  vì  $\eta GF_n$  nhỏ. Nhiễu nhiệt  $\sigma_T^2$  cũng có thể bỏ qua khi so sánh với các số hạng trội hơn. Các dòng nhiễu  $\sigma_1$  và  $\sigma_0$  được lấy xấp xỉ như sau:

$$\sigma_1 = (\sigma_{sig-sp}^2 + \sigma_{sp-sp}^2)^{1/2}, \sigma_0 = \sigma_{sp-sp} \quad (2.33)$$

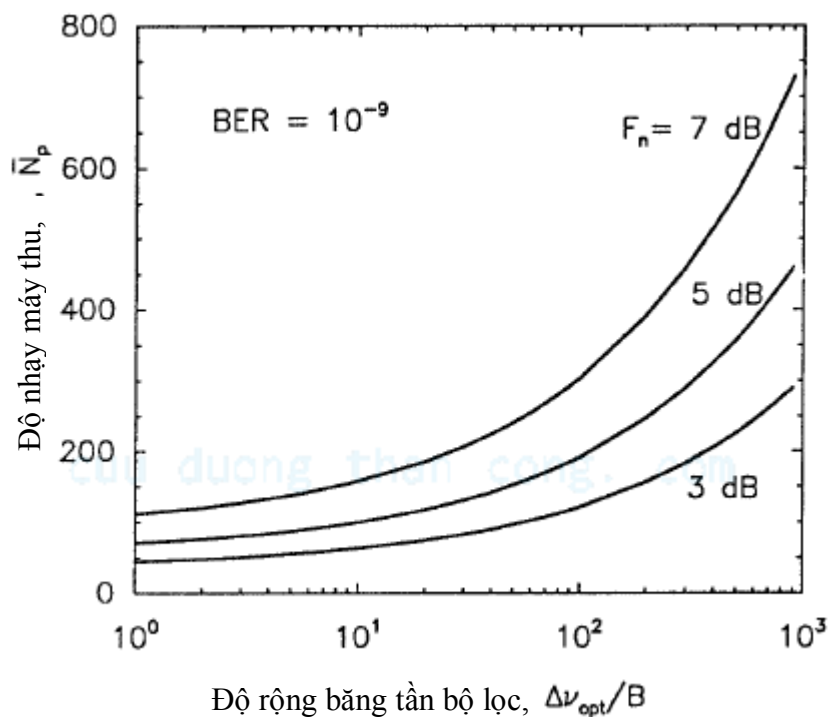
Độ nhạy máy thu có được bằng cách thay biểu thức (2.33) vào biểu thức (2.32) và sử dụng biểu thức (2.30), (2.31) với  $P_s = 2\bar{P}_{rec}$  để tìm  $\bar{P}_{rec}$ . Kết quả là:

$$\bar{P}_{rec} = h\nu F_n \Delta f [Q^2 + Q(\Delta\nu_{opt} / \Delta f)^{1/2}] \quad (2.34)$$

Độ nhạy máy thu cũng có thể viết dưới dạng số lượng trung bình của photon/ bit  $\bar{N}_p$  nhờ sử dụng  $\bar{P}_{rec} = \bar{N}_p h\nu B$ . Đặt  $\Delta f = B/2$  là giá trị điển hình của độ rộng băng tần máy thu  $\bar{N}_p$  và cho bởi biểu thức:

$$\bar{N}_p = \frac{1}{2} F_n \left[ Q^2 + Q(2\Delta\nu_{opt}/B)^{1/2} \right] \quad (2.35)$$

Biểu thức (2.35) là cách biểu diễn đơn giản của độ nhạy máy thu. Nó thể hiện tại sao phải sử dụng các bộ khuếch đại có hệ số nhiễu nhỏ; độ nhạy máy thu giảm khi  $F_n$  tăng. Nó cũng chỉ rõ rằng các bộ lọc quang có thể cải thiện độ nhạy máy thu như thế nào khi sử dụng  $\Delta\nu_{opt}$ . Hình 2.16 thể hiện  $\bar{N}_p$  là hàm của  $\Delta\nu_{opt}/B$  đối với hầu hết giá trị của hệ số nhiễu  $F_n$  khi lấy  $Q=6$ , giá trị yêu cầu để thực hiện  $BER = 10^{-9}$ .



Hình 2.16- Độ nhạy máy thu phụ thuộc

độ rộng băng tần bộ lọc đối với một số trị số  $F_n$

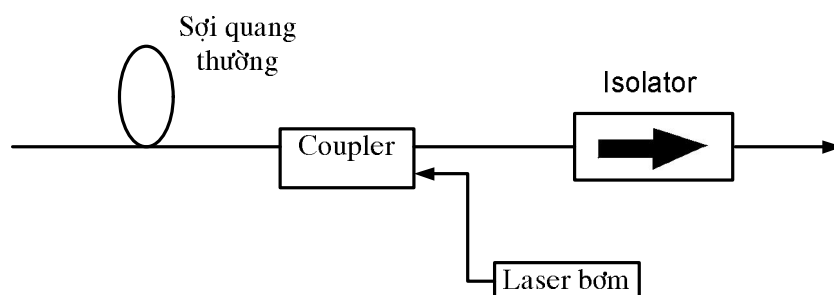
Độ rộng băng tần quang tối thiểu phải bằng tốc độ bit để tránh nghẽn tín hiệu. Giá trị tối thiểu của  $F_n$  là 2 đối với bộ khuếch đại lý tưởng. Vì vậy khi sử dụng  $Q=6$ , độ nhạy máy thu tốt nhất từ biểu thức (2.35) là  $\bar{N}_p = 44,5$  photon/ bit. Giá trị này có thể so sánh với  $\bar{N}_p = 10$  đối với máy thu lý tưởng hoạt động trong giới hạn nhiễu lượng tử. Tất nhiên  $\bar{N}_p = 10$  là không thể thực hiện được trong thực tế do nhiễu nhiệt; thông thường  $\bar{N}_p$  lớn hơn 1000 đối với máy thu không có khuếch đại quang. Phân tích trong phần này chỉ rõ rằng  $\bar{N}_p < 100$  có thể thực hiện được khi các bộ khuếch đại quang được sử dụng làm tiền khuếch đại tín hiệu thu mặc dù bị giảm do nhiễu phát xạ tự phát. Đường phổ hẹp của laser cũng ảnh hưởng đến độ nhạy máy thu.

Cải thiện độ nhạy máy thu được thực hiện khi sử dụng EDFA hoạt động như bộ khuếch đại công suất để tăng khoảng cách truyền dẫn tuyến quang điểm nối điểm nội thị và giữa các đảo. Mặt khác EDFA hoạt động như bộ khuếch đại công suất cũng thường được sử dụng để tăng công suất tới mức cao 100 mW. Vào năm 1992, một tín hiệu 2,5 Gbit/s đã được truyền trên khoảng cách 318 km nhờ kỹ thuật như vậy. Tốc độ bit tăng tới 5 Gbit/s được truyền khi sử dụng hai EDFA để khuếch đại công suất tín hiệu từ - 8 đến 15,5 dBm ( khoảng 35 mW). Mức công suất này là đủ lớn nên SBS trở thành vấn đề. SBS có thể loại trừ thông qua điều pha sóng mang quang nên mở rộng độ rộng đường sóng mang tới 200 MHz hoặc lớn hơn. Điều chế trực tiếp laser cũng gây ra dịch tần và nới rộng phổ tín hiệu. Thực nghiệm vào năm 1996 đã truyền tín hiệu 10 Gbit/s trên khoảng cách 442 km khi sử dụng các bộ khuếch đại đường bơm từ xa.

## 2.4- BỘ KHUẾCH ĐẠI RAMAN (RA)

### 2.4.1- Cấu trúc và nguyên lý khuếch đại tín hiệu

Không giống như nguyên lý khuếch đại của EDFA, khuếch đại Raman không cần một sợi quang pha ion  $\text{Er}^{3+}$  riêng. Trong khuếch đại Raman, tín hiệu quang được khuếch đại dọc theo toàn bộ chiều dài của sợi quang silic bình thường. Cấu trúc của một bộ khuếch đại Raman được minh họa trong hình 2.17.



Hình 2.17- Cấu trúc của bộ khuếch đại Raman

Sợi quang là nơi xảy ra quá trình khuếch đại. Sợi quang này cũng là sợi quang truyền tín hiệu như sợi SMF, DSF, ... Trong bộ khuếch đại quang RA không cần sử dụng sợi quang đặc biệt (pha ion Erbium) như bộ khuếch đại EDFA.

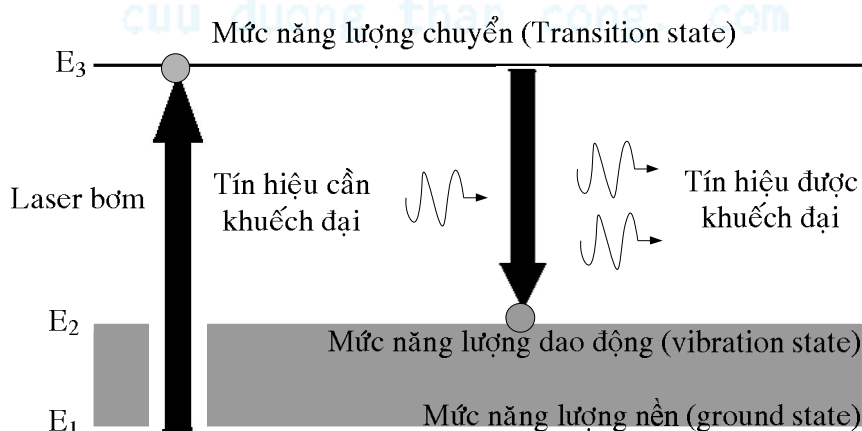
Coupler dùng để ghép bước sóng tín hiệu vào với bước sóng bơm.

Laser bơm dùng để cung cấp năng lượng cho các nguyên tử của sợi quang chuyển lên trạng thái kích thích, giúp tạo ra sự nghịch đảo nồng độ.

Bộ cách ly đặt ở hai đầu của bộ khuếch đại quang để ngăn chặn tín hiệu phản xạ ở hai đầu bộ khuếch đại. Đồng thời nó cũng giúp loại trừ nhiễu ASE theo hướng ngược về phía đầu vào có thể gây ảnh hưởng đến tín hiệu đầu vào.

Khuếch đại Raman dựa trên hiện tượng tán xạ Raman kích thích. Tán xạ Raman kích thích là hiện tượng một nguyên tử hấp thụ năng lượng của một photon, sau đó tạo ra một photon có năng lượng khác. Vì vậy, tán xạ Raman kích thích được định nghĩa là hiện tượng photon thứ cấp được sinh ra do kích thích từ nguồn bên ngoài.

Để có khuếch đại Raman phải tạo ra sự nghịch đảo nồng độ. Điều này đạt được bằng cách cung cấp năng lượng cho các nguyên tử của sợi quang từ một laser bơm có bước sóng thấp hơn bước sóng của tín hiệu. Khi đó, các nguyên tử của sợi quang sẽ hấp thụ năng lượng bơm có năng lượng cao (bước sóng ngắn) và chuyển lên mức năng lượng cao hơn. Khi có tín hiệu đến, nó sẽ kích thích các nguyên tử đang ở mức năng lượng cao chuyển sang trạng thái năng lượng thấp hơn và giải phóng ra một năng lượng dưới dạng photon ánh sáng có cùng bước sóng (dài hơn bước sóng bơm) và cùng pha với tín hiệu đến. Do đó, tín hiệu đã được khuếch đại (xem hình 2.18).



Hình 2.18 - Sơ đồ chuyển năng lượng trong khuếch đại Raman

Dựa trên giản đồ năng lượng trên, tần số ánh sáng bơm  $f_{\text{bơm}}$  và tần số ánh sáng được khuếch đại  $f_{\text{khuếch đại}}$  được xác định như sau:

$$f_{\text{bơm}} = (E_3 - E_1)/h \quad (2.36)$$

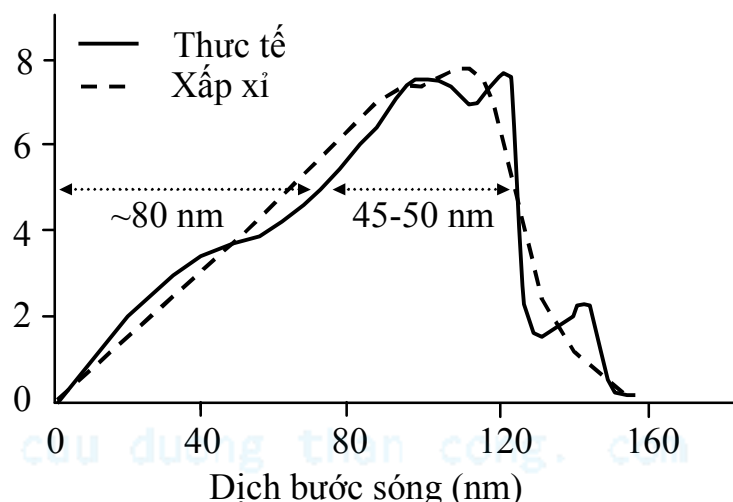
$$f_{\text{khuếch đại}} = (E_2 - E_1)/h \quad (2.37)$$

trong đó:  $h$  là hằng số Planck;  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  là năng lượng của các trạng thái chuyển dịch, trạng thái trung gian và trạng thái nền của các nguyên tử trong sợi quang.

## 2.4.2 Các tham số

### 1) Hệ số khuếch đại

Hình 2.19 biểu diễn sự thay đổi hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại Raman theo độ chênh lệch bước sóng giữa tín hiệu và nguồn bơm. Qua đó cho thấy, hệ số khuếch đại Raman tăng hầu như tuyến tính với độ chênh lệch bước sóng giữa tín hiệu và nguồn bơm, đạt giá trị đỉnh tại 100 nm và giảm nhanh chóng sau đó. Trong hình cũng cho thấy, băng thông khuếch đại của bộ khuếch đại Raman có thể đạt được từ 45 nm đến 50 nm.

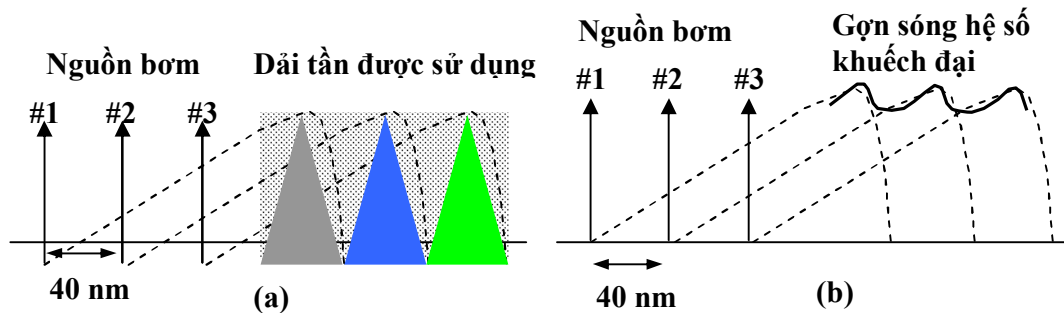


Hình 2.19- Hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại Raman thay đổi theo độ chênh lệch bước sóng của tín hiệu và nguồn bơm

### 2) Nguồn bơm

Nếu dải tần của các tín hiệu cần khuếch đại Raman lớn hơn băng thông bộ khuếch đại của bộ khuếch đại Raman (giả sử 40nm), cần phải sử dụng nhiều nguồn bơm khác nhau. Mỗi nguồn bơm có bước sóng cách nhau khoảng 40nm (bằng băng thông bộ khuếch đại). Khi đó, dải tần lớn của các tín hiệu có thể được khuếch đại một cách hiệu quả (hình 2.20-a). Tuy nhiên, do đặc tính khuếch đại của bộ khuếch đại Raman và do khoảng của các bước sóng bơm, băng thông khuếch đại tổng cộng có dạng gợn sóng như hình 2.20-b.

Với ưu điểm băng thông khuếch đại lớn, bộ khuếch đại Raman được quan tâm đến trong các ứng dụng thông tin quang. Tuy nhiên hiệu suất khuếch đại của bộ khuếch đại Raman không cao. Để đạt được hệ số khuếch đại lớn, cần phải sử dụng công suất bơm tương đối cao.



Hình 2.20 - (a) Với khoảng cách các nguồn bơm 40nm, các kênh nằm trong dải tần rộng được khuếch đại; (b) Gọn sóng hệ số khuếch đại do khuếch đại Raman và do khoảng cách các nguồn bơm

## 2.5 SO SÁNH CÁC LOẠI BỘ KHUẾCH ĐẠI

### 2.5.1 Ưu khuyết điểm của bộ khuếch đại SOA

#### 2.5.1.1 Ưu điểm

- Hệ số khuếch đại lớn (25-30dB).
- Kích thước nhỏ, có thể tích hợp với các linh kiện quang bán dẫn khác.
- Dải thông lớn, có thể lên tới 100 nm, rộng hơn so với EDFA.
- Có thể thực hiện khuếch đại tín hiệu ở cả hai cửa sổ ánh sáng 1300nm và 1550 nm.

#### 2.5.1.2 Khuyết điểm

- Công suất ra bão hòa thấp (khoảng 5mW) hạn chế khả năng của SOA khi được sử dụng làm bộ khuếch đại công suất.
- Hệ số nhiễu cao (5-7 dB) ảnh hưởng đến chất lượng của SOA khi được sử dụng làm bộ tiền khuếch đại và khuếch đại đường dây.
- Phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu quang tới
- Xuyên nhiễu kênh lớn do các hiệu ứng phi tuyến: hiệu ứng trộn 4 bước sóng FWM và hiệu ứng bão hòa hệ số khuếch đại chéo
- Phổ khuếch đại có dạng gọn sóng do không hoàn hảo của lớp chống phản xạ tạo ra
- kém ổn định do hệ số khuếch đại chịu ảnh hưởng của nhiệt độ

### 2.5.2 Ưu khuyết điểm của bộ khuếch đại EDFA

#### 2.5.2.1 Ưu điểm

- Nguồn laser bơm bán dẫn có độ tin cậy cao, gọn và công suất cao.
- Cấu hình đơn giản: hạ giá thành của hệ thống.
- Cấu trúc nhỏ gọn: có thể lắp đặt nhiều EDFA trong cùng một trạm, dễ vận chuyển và thay thế.

- Công suất nguồn nuôi nhỏ: thuận lợi khi áp dụng cho các tuyến thông tin quang vượt biển.
- Không có nhiễu xuyên kênh khi khuếch đại các tín hiệu WDM như bộ khuếch đại quang bán dẫn.
- Hầu như không phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu.

#### **2.5.2.2 Khuyết điểm**

- Phổ khuếch đại của EDFA không bằng phẳng.
- Băng tần hiện nay bị giới hạn trong băng C và băng L.
- Nhiễu được tích lũy qua nhiều chặng khuếch đại gây hạn chế cự ly truyền dẫn.

### **2.5.3 Ưu khuyết điểm của bộ khuếch đại Raman**

#### **2.5.3.1 Ưu điểm**

So với các loại khuếch đại quang khác, bộ khuếch đại Raman có những ưu điểm sau:

- Nhiều thấp
- Cấu trúc đơn giản, không cần sợi đặc biệt.
- Dễ chọn băng tần.
- Có thể đạt được băng thông rộng nhờ kết hợp vài laser bơm.

#### **2.5.3.2 Khuyết điểm**

Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm, bộ khuếch đại Raman cũng có những nhược điểm như sau:

- Xuyên nhiễu giữa các kênh tín hiệu do hiện tượng tán xạ Raman kích thích SRS. Đây là một trong các hiệu ứng phi tuyến của sợi quang có thể gây ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống ghép kênh theo bước sóng WDM.
- Hệ số khuếch đại thấp.
- Hiệu suất khuếch đại thấp hơn so với EDFA: khuếch đại Raman cần một công suất bơm lớn hơn để đạt cùng một giá trị hệ số khuếch đại

## **2.6- KẾT LUẬN**

Các bộ khuếch đại quang, đặc biệt là các bộ khuếch đại quang sợi, đóng vai trò rất quan trọng trong hệ thống thông tin quang cự ly dài và tốc độ bit cao. Bởi vì các bộ khuếch đại quang khuếch đại trực tiếp tín hiệu quang, có khả năng khuếch đại đồng thời nhiều kênh quang của hệ thống WDM. Trong các loại bộ khuếch đại quang thì bộ khuếch đại quang sợi pha erbium (EDFA) được sử dụng phổ biến nhất. Bộ khuếch đại quang sợi loại này được sử dụng trong các lĩnh vực như: Bộ tiền khuếch đại để nâng cao độ nhạy máy thu, bộ khuếch đại công suất và bộ lặp quang.

Cả ba vị trí này của EDFA đều đưa đến kết quả là cự ly của tuyến thông tin quang tăng lên đáng kể.

cuu duong than cong. com

cuu duong than cong. com

## **CÂU HỎI VÀ BÀI TẬP**

- 1- Nhiệm vụ của khuếch đại quang (OA) trong hệ thống WDM là:
  - a. Ngăn không cho tín hiệu quang phản xạ về phía máy phát.
  - b. Bù suy hao trên đường truyền.
  - c. Bù tán sắc trên đường truyền.
- 2- Trạng thái nghịch đảo nồng độ trong SOA được thực hiện bằng cách:
  - a. Sử dụng khoang cộng hưởng Fabry-Perot.
  - b. Sử dụng dòng điện phân cực thuận.
  - c. Bơm ánh sáng có bước sóng 1480nm.
- 3- Môi trường xảy ra quá trình khuếch đại trong EDFA là:
  - a. Khoang cộng hưởng Fabry-Perot.
  - b. Sợi quang pha Erbium.
  - c. Chất bán dẫn.
- 4- Độ rộng băng tần khuếch đại của EDFA là từ:
  - a. 980nm đến 1480nm.
  - b. 1480nm đến 1550nm.
  - c. 1530nm đến 1565nm.
- 5- Ưu điểm của khuếch đại Raman so với khuếch đại quang sợi EDFA là:
  - a. Hệ số khuếch đại lớn hơn.
  - b. Linh động hơn trong việc chọn băng tần khuếch đại.
  - c. Sử dụng laser bơm có công suất nhỏ hơn.
- 6- Sử dụng kỹ thuật khuếch đại Raman với các nguồn bơm có bước sóng lần lượt là 1450nm và 1520nm có thể khuếch đại tín hiệu quang có bước sóng là:
  - a. 1310nm và 1550nm.
  - b. Trong băng C.
  - c. Trong băng C và băng L.
- 7- Nguyên nhân gây ra nhiễu ASE trong khuếch đại quang là do:
  - a. Hiện tượng trộn bốn sóng quang (FWM).
  - b. Hiện tượng phát xạ tự phát.

- c. Xuyên nhiễu giữa tín hiệu và nguồn bơm.
- 8- So với khuếch đại đường dây, khuếch đại công suất có đặc điểm:
  - a. Nhiễu nhỏ hơn.
  - b. Công suất đầu ra bão hòa lớn hơn.
  - c. Băng thông khuếch đại nhỏ hơn.
- 9- Cho  $P_{in}$  là công suất tín hiệu tại đầu vào;  $G$  và  $P_{ASE}$  là hệ số khuếch đại và công suất nhiễu ASE của bộ khuếch đại. Hãy xác định công suất quang thu được tại đầu ra,  $P_{out}$ , của bộ khuếch đại.
- 10- Cho  $P_{in}$ ,  $P_{out}$  là công suất tín hiệu tại đầu vào và đầu ra;  $N_{in}$ ,  $N_{out}$  là công suất nhiễu tại đầu vào và đầu ra;  $G$  và  $P_{ASE}$  là hệ số khuếch đại và công suất nhiễu ASE của bộ khuếch đại. Hãy xác định hệ số nhiễu NF (Noise Figure) của bộ khuếch đại.

cuu duong than cong. com

cuu duong than cong. com