

CHƯƠNG 4

BỘ THU QUANG

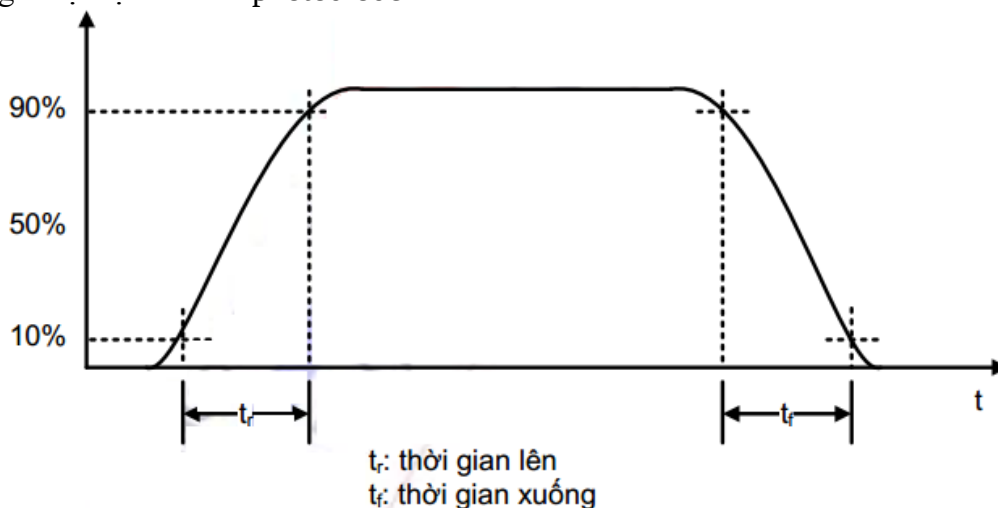
Bộ thu có chức năng nhận tín hiệu quang, chuyển tín hiệu quang thành điện, xử lý và khôi phục dạng tín hiệu. Trong chương này sẽ trình bày cấu trúc tổng quát của bộ thu quang số, các mạch tiền khuếch đại, khảo sát nhiễu trong bộ thu quang, và đánh giá chất lượng của hệ thống quang.

4.1. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN

4.1.1. Độ đáp ứng phần tử chuyển đổi quang - điện

Photodiode cần phải có tốc độ đáp ứng nhanh để có thể hoạt động với tín hiệu tốc độ cao. Nếu ngõ ra của photodiode không theo kịp với sự thay đổi của dạng tín hiệu quang ngõ vào thì dạng xung ngõ ra sẽ bị méo. Điều này sẽ ảnh hưởng đến chất lượng của tuyến do lỗi bit. Tốc độ đáp ứng của photodiode có thể đo theo thời gian lên của tín hiệu ngõ ra, từ 10% đến 90% giá trị đỉnh tín hiệu ngõ ra khi ngõ vào của photodiode chuyển sang vừa chuyển trạng thái on. Tương tự như vậy khi tín hiệu ngõ ra chuyển xuống từ 90% đến 10% giá trị đỉnh, gọi là thời gian xuống. Thời gian lên và thời gian xuống được minh họa ở hình 4.1.

Thời gian lên và thời gian xuống phụ thuộc vào các nhân tố như mức độ hấp thụ ánh sáng ở một sóng nào đó, độ rộng vùng hiếm, sự thay đổi giá trị điện dung, sự thay đổi giá trị điện trở của photodiode



Hình 4.1. Đáp ứng của photodiode với xung ánh sáng biểu diễn thời gian lên 10 % đến 90% và thời gian xuống 90% đến 10%.

4.1.2. Thời gian đáp ứng phần tử chuyển đổi quang - điện

Tốc độ đáp ứng hay băng thông của photodiode phụ thuộc vào ba yếu tố: thời gian vượt ra khỏi vùng hiếm (gọi là thời gian trôi) của các hạt mang điện tạo ra từ các photon tới vùng này, đáp ứng tần số được xác định bởi thời hằng RC (phụ thuộc vào điện dung của diode), và sự khuếch tán các hạt mang điện ra khỏi vùng hiếm.

Thời gian hạt mang điện vượt khỏi vùng hiếm có chiều dài w được xác định theo biểu thức sau:

$$\tau_t = \frac{W}{V_d} \quad (4.1)$$

Với v_d là vận tốc trôi của hạt mang điện. w càng nhỏ thì τ_t càng nhỏ và sẽ càng ít bị giới hạn đến thời gian trôi. Ngược lại, w nhỏ sẽ làm giới hạn hiệu suất lượng tử. Chúng ta xét ví dụ đối với photodiode PIN Si có độ rộng lớp I là $20\mu\text{m}$, vận tốc trôi của các hạt electron là 10^5m/s . Do đó, thời gian để vượt qua vùng I là 200ps . Còn nếu vật liệu chế tạo PIN là InGaAs có độ rộng lớp I là $5\mu\text{m}$ thì thời gian trôi là 50ps . Các giá trị tính được ở trên tương ứng với thời gian chuyển lên của photodiode. Bên cạnh đó, điện dung của photodiode cũng đóng vai trò đáng kể. Nếu diện tích của diode là A và vùng hiếm có độ rộng là w thì điện dung mỗi nối là:

$$C_d = \frac{\epsilon A}{W}$$

Trong đó ϵ là hằng số điện môi của chất bán dẫn. Trong mạch hình 4.1, tốc độ đáp ứng được xác định bởi thời hằng RC. Do đó thời gian lên (10%-90%) là:

$$t_r = 2,19R_L C_d = 2,19R_L \frac{\epsilon A}{W} \quad (4.2)$$

Trong công thức trên, giảm w để giảm thời gian trôi thì sẽ làm tăng thời gian lên do điện dung. Chúng ta có thể cân bằng hai đại lượng này bằng cách giảm điện trở tại R_L . Băng thông của photodiode được xác định bởi R_L và C_d như sau:

$$B = \frac{1}{2\pi R_L C_d} \quad (4.3)$$

Rõ ràng để có được thời gian lên nhỏ, photodiode phải có diện tích A nhỏ, độ rộng vùng hiếm w lớn và điện trở tải R_L nhỏ.

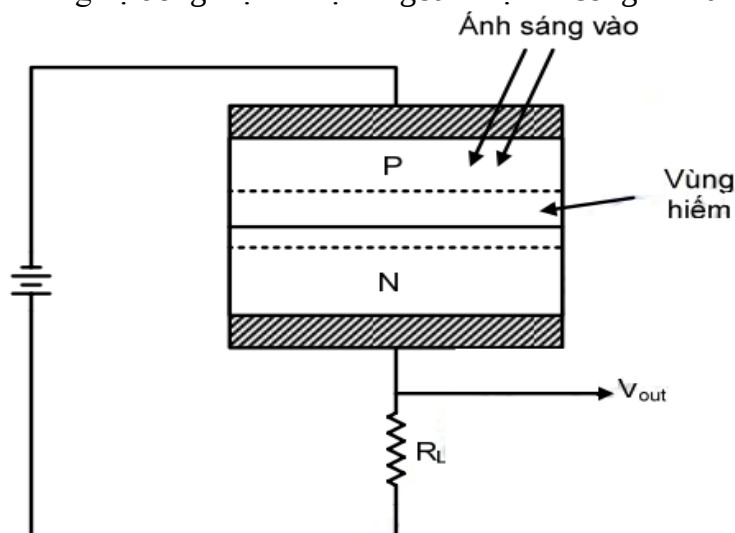
4.2. CÁC PHẦN TỬ CHUYỂN ĐỔI QUANG - ĐIỆN BÁN DẪN

4.2.1. Photodiode p - n

Photodiode P-N là mối nối P-N hoạt động ở chế độ dòng phân cực ngược, được minh họa như hình 4.1. Ánh sáng tới phải lọt vào vùng hiếm của mối nối P-N. Ánh sáng này sẽ được hấp thụ trong vùng hiếm và phân phối năng lượng cho vật liệu. Nếu năng lượng hấp thụ đủ lớn, một cặp điện tử-lỗ trống được tạo ra. Sự phân cực ngược mối nối P-N tạo ra một điện trường lớn trên vùng hiếm, điện trường này sẽ làm cho cặp điện tử-lỗ trống này di chuyển ra khỏi vùng hiếm và ra mạch ngoài tạo

CHƯƠNG 4: BỘ THU QUANG

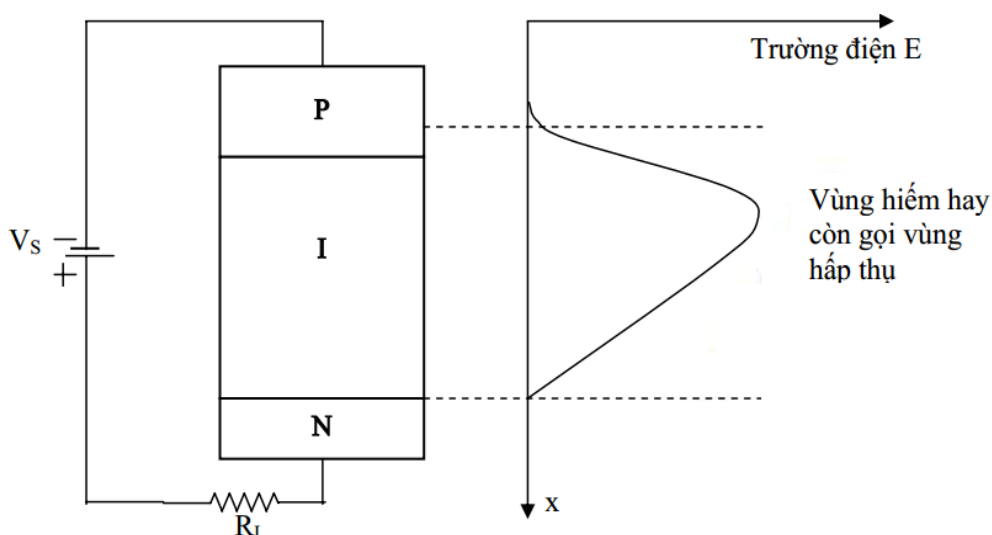
thành dòng điện. Dòng điện này say khi qua điện trở tải R_L để chuyển thành điện áp V_{out} . Tín hiệu này sẽ được qua các tần tiếp theo để xử lý. Số lượng cặp điện tử-lỗ trống được tạo ra trong một giây phụ thuộc tuyến tính với công suất trường ánh sáng tới, do đó cường độ dòng điện ở mạch ngoài tỉ lệ với công suất ánh sáng tới.



Hình 4.2. Sơ đồ photodiode P-N

4.2.2. Photodiode PIN

Cấu tạo của diode PIN gồm ba lớp bán dẫn, trong đó lớp I (Intrinsic) là lớp bán dẫn không pha tạp chất hoặc pha tạp chất rất ít nên không có điện tử tự do nên có điện trở rất lớn. Và lớp này nằm giữa hai lớp P và N. Lớp I đóng vai trò giống vùng hiếm trong mối nối P-N nhưng có chiều dài lớn hơn nhằm tăng hiệu suất hấp thụ photon tới.



Hình 4.3. Sự phân bố năng lượng điện trường trong các lớp bán dẫn của PIN

Bởi vì lớp I rất rộng nên xác suất tiếp nhận photon ở lớp này cao hơn và do đó sự hấp thụ photon ở lớp này nhiều hơn so với hai lớp P và N. Như vậy khi lớp I càng dày thì hiệu suất lượng tử càng cao. Tuy nhiên khi đó thời gian trôi của điện tử lớn

nên làm giảm khả năng hoạt động tốc độ cao của PIN.

Khả năng thâm nhập ánh sáng phụ thuộc vào bề dày lớp P. Ánh sáng có bước sóng càng dài càng dễ thâm nhập vào bán dẫn.

Ví dụ: Hãy xác định công suất nhỏ nhất có thể phát hiện được của PIN diode, có $R = 20\Omega$ và $I_D = 1\text{nA}$.

Giả sử chúng ta có thể phân biệt được sự hiện diện của công suất quang khi dòng tín hiệu tạo ra bằng với dòng tối.

Do đó: $P = I_p^2 R = 2\text{nW}$.

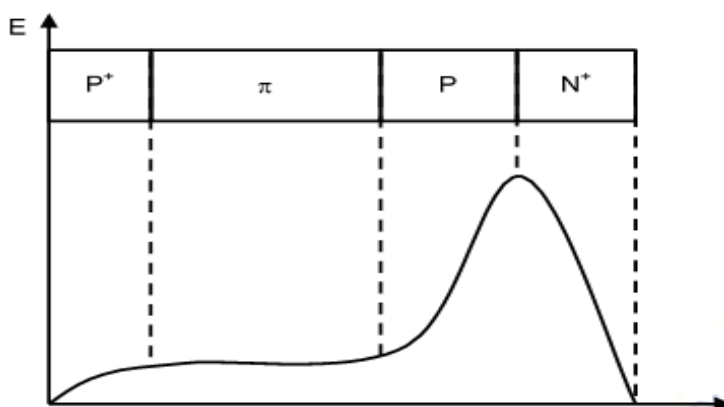
4.2.3. Photodiode APD

APD là bộ tách sóng mỗi nối bán dẫn, có độ lợi nội (internal gain) và độ lợi nội này làm tăng đáp ứng so với PN photodiode hay PIN photodiode.

Người ta chế tạo ADP gồm bốn lớp: $P^+ \pi P N^+$

$P^+ N^+$ là hai lớp bán dẫn có nồng độ tạp chất cao, nên điện trở của hai vùng này nhỏ, do đó áp rơi rất nhỏ.

π là vùng có nồng độ tạp chất rất ít và gần như tinh khiết. Nó giống như lớp I của PIN. Hầu như tất cả các photon bị hấp thụ trong vùng này, và tạo ra các cặp lỗ trống - điện tử tự do.



Hình 4.4 Sự phân bố năng lượng điện trường trong các lớp bán dẫn

Sự nhân dòng theo cơ chế thác lũ diễn ra như sau:

Dưới tác dụng của nguồn phân cực ngược, sự phân bố cường độ điện trường trong các lớp bán dẫn như hình 4.4. Trong đó trường vùng tiếp giáp PN^+ cao nhất, quá trình nhân điện tử xảy ra ở vùng này. Vùng này còn được gọi là vùng “thác lũ”.

Khi có ánh sáng chiếu vào, các photon bị hấp thụ trong lớp π , tạo các cặp e-p (electron-lỗ trống). Dưới sự định hướng của điện trường ngoài, các lỗ trống di chuyển về phía P^+ (nối cực âm của nguồn) còn các điện tử di chuyển về phía tiếp giáp PN^+ . Điện trường cao trong vùng tiếp giáp PN^+ sẽ tăng tốc cho điện tử. Khi những điện tử này đập vào các nguyên tử tinh thể bán dẫn tạo ra thêm các cặp điện tử và lỗ trống mới. Những hạt mang điện mới được gọi là những hạt mang điện thứ cấp (secondary charge). Những hạt mang điện thứ cấp này bản thân nó được

tăng tốc và tạo ra nhiều hạt mang điện thứ cấp khác. Quá trình cứ tiếp diễn và số lượng hạt mang điện được tạo ra rất nhiều. Quá trình này được gọi là quá trình nhân thác lũ.

4.3. NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG

Trong đặc tính kỹ thuật về chất lượng nhiễu của bộ thu quang, người ta thường sử dụng tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR (signal-to-noise). Tín hiệu ở đây là công suất tín hiệu, nhiễu ở đây là công suất nhiễu, cả hai đại lượng này giả sử dòng của chúng cùng chảy trên giá trị điện trở chuẩn. SNR có thể được biểu diễn như sau:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{Signal}}{P_{Noise}} \quad (4.4)$$

4.3.1. Nhiễu nơ

Nhiễu nơ được tạo ra do thực tế là dòng photon được tạo ra bao gồm các hạt mang điện được tạo ra một cách ngẫu nhiên theo thời gian. Tính thống kê của quá trình ngẫu nhiên này tuân theo luật phân bố Poisson. Như vậy, khi công suất quang đến bộ thu là không đổi thì dòng photo tạo ra sẽ như sau:

$$I(t) = I_p + i_s(t)$$

Với $I_p = RP_{in}$ là dòng trung bình và $i_s(t)$ là thăng giáng về dòng do nhiễu nơ gây ra. Về mặt toán học, $i_s(t)$ là quá trình ngẫu nhiên dừng tuân theo luật thống kê Poisson (thường được xấp xỉ bằng luật thống kê Gauss). Hàm tự tương quan của $i_s(t)$ và mật độ phổ công suất $S_s(f)$ quan hệ với nhau theo định lý Weiner-Khinchin như sau:

$$\langle i_s(t)i_s(t + \tau) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_s(f) \exp(i2\pi f\tau) df$$

Mật độ phổ công suất của nhiễu nơ $S_s(f)$ là hằng số và $S_s(f) = qI_p$. Lưu ý rằng, $S_s(f)$ là một độ phổ công suất 2 phía (bao gồm cả các thành phần tần số âm). Nếu chỉ xét đến các thành phần tần số dương, mật độ phổ công suất một phía sẽ là $2qI_p$.

Thay $\tau=0$ vào phương trình ta sẽ có phương sai nhiễu nơ được tính theo công thức sau:

$$\sigma_s^2 = \langle i_s^2(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_s(f) df = 2qI_p \Delta f$$

Với Δf là băng tần nhiễu hiệu dụng của bộ thu. Giá trị chính xác của Δf phụ thuộc vào thiết kế của bộ thu.

Vì dòng tối I_d cũng tạo ra nhiễu nơ. Nên nếu ta thay I_p bằng $I_p + I_d$ thì phương sai nhiễu nơ tổng sẽ được tính theo công thức sau:

$$\sigma_s^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f \quad (4.5)$$

Giá trị này chính là giá trị hiệu dụng (rms) của dòng nhiễu tạo ra bởi nhiễu nơ.

4.3.2. Nhiều nhiệt

Nhiều nhiệt sinh ra do chuyển động nhiệt ngẫu nhiên của các điện tử bên trong điện trở tải gây nên sự thăng giáng về dòng. Nhiều này còn được gọi là nhiễu Nyquist hay nhiễu Johnson. Với sự đóng góp của nhiễu nhiệt, phương trình được viết lại như sau:

$$I(t) = I_p + i_s(t) + i_T(t)$$

Với $i_T(t)$ là sự thăng giáng về dòng do nhiễu nhiệt gây ra. Về mặt toán học, nhiễu nhiệt cũng có thể được coi là một quá trình ngẫu nhiên dừng tuân theo luật phân bố Gauss với mật độ phổ không phụ thuộc vào tần số f lên đến 1THz (gần giống nhiễu trắng) và được tính theo công thức sau:

$$S_T(f) = 2k_B T / R_L$$

Với k_B là hằng số Boltzman, T là nhiệt độ tuyệt đối, R_L là điện trở tải. Cũng giống như nhiễu nỏ, $S_T(f)$ là mật độ phổ hai phía. Hàm tự tương quan của $i_T(t)$ cũng được tính theo công thức, nếu ta thay $i_s(t)$ trong công thức này bằng $i_T(t)$. Thay $\tau=0$ vào phương trình ta sẽ có phương sai nhiễu nhiệt được tính theo công thức sau:

$$\sigma_T^2 = \langle i_T^2(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_T(f) df = \left(\frac{4k_B T}{R_L} \right) \Delta f$$

Với Δf là băng tần nhiễu hiệu dụng của bộ thu. Lưu ý rằng, khác với phương sai nhiễu nỏ, phương sai nhiễu nhiệt không phụ thuộc vào dòng trung bình I_p .

Phương trình mới chỉ tính đến nhiễu nhiệt tạo ra trên điện trở tải. Mạch thu, trong thực tế còn gồm rất nhiều phần tử điện khác. Các thành phần này cũng góp phần tạo ra nhiễu. Để đơn giản, người ta đưa thêm vào công thức, hệ số nhiễu khuếch đại, khi đó được viết lại như sau:

$$\sigma_T^2 = \left(\frac{4k_B T}{R_L} \right) F_n \Delta f \quad (4.6)$$

Vì $i_s(t)$ và $i_T(t)$ là các quá trình ngẫu nhiên độc lập và đều có thể gần đúng bằng quá trình ngẫu nhiên Gauss nên phương sai nhiễu tổng (bao gồm nhiễu nỏ và nhiễu nhiệt) được tính theo công thức sau:

$$\sigma^2 = \langle (\Delta I)^2 \rangle = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f + \left(\frac{4k_B T}{R_L} \right) \Delta f \quad (4.7)$$

BÀI TẬP CHƯƠNG 4

Câu 1: Các đặc tính về độ đáp ứng và thời gian đáp ứng ảnh hưởng đến tính năng của bộ thu quang như thế nào?

Câu 2: Trình bày cấu trúc của các phần tử thu quang Photodiode P-N.

CHƯƠNG 4: BỘ THU QUANG

Câu 3: Trình bày cấu trúc của các phần tử thu quang Photodiode PIN và APD.

Câu 4: Hãy so sánh đặc tính chuyển đổi quang-điện của các Photodiode sử dụng trong bộ thu quang?

Câu 5: Nhiễu có tác động như thế nào trong bộ thu quang?

Câu 6: So sánh tác động giữa các loại nhiễu nơ và nhiễu nhiệt.

Câu 7: Hãy xác định công suất nhỏ nhất có thể phát hiện được của PIN diode, có $R = 1\text{Ohm}$ và $I_D = 3\text{nA}$.

Câu 8: Hãy xác định công suất nhỏ nhất có thể phát hiện được của APD diode, có $R = 0.5\text{Ohm}$ và $I_D = 2\text{nA}$.

Câu 9: Hãy xác định dòng có thể phát hiện được của PIN diode, có $R = 1\text{Ohm}$ và $P_D = 10\text{nW}$.

Câu 10: Cho vận tốc trôi $V_d = 10^5 \text{ m/s}$, độ rộng $W = 200\text{ps}$. Xác định thời gian vượt qua vùng hiếm.

CHƯƠNG 5

KHUYẾT ĐẠI QUANG

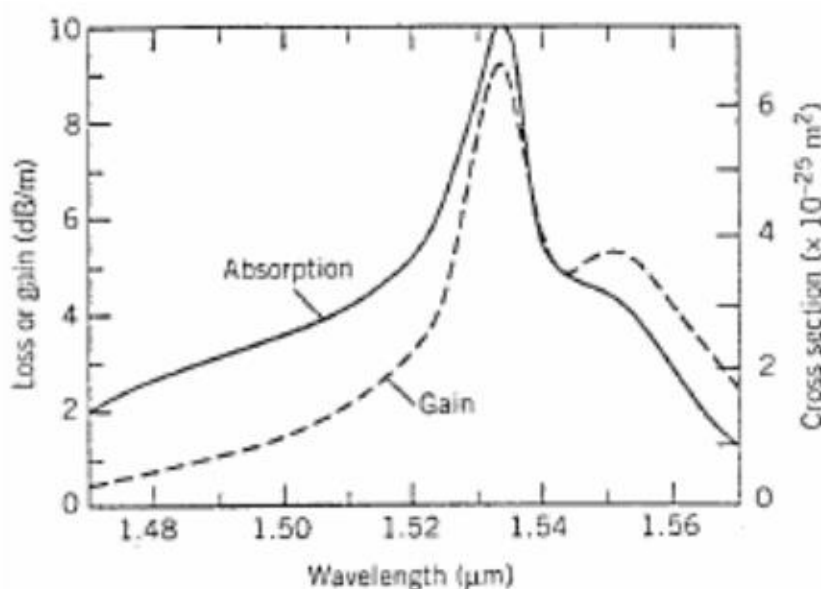
Trang bị cho sinh viên: Kiến thức cơ bản về bộ khuếch đại quang.

5.1. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN

5.1.1. Phổ và độ rộng băng tần khuếch đại quang

Phổ độ lợi của EDFA được trình bày trong hình 5.1 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 5.1 cho thấy phổ độ lợi của EDFA có lõi pha Ge khá rộng. Tuy nhiên, phổ độ lợi này không bằng phẳng. Điều này sẽ dẫn đến việc hệ số khuếch đại khác nhau đối với các bước sóng khác nhau. Nếu độ lợi của các kênh tín hiệu không đồng nhất, nhất là sau khi qua nhiều tầng EDFA, sai số độ lợi này sẽ tích lũy tuyến tính đến mức khi tới đầu thu kênh bước sóng có độ lợi cao làm cho đầu vào máy thu quá tải. Ngược lại, kênh tín hiệu có độ lợi nhỏ thì tỉ số SNR không đạt yêu cầu. Sự làm phẳng độ lợi là cần thiết để loại bỏ sự khuếch đại méo các tín hiệu qua các EDFA đường truyền ghép tầng.



Hình 5.1 Phổ hấp thụ (absorption spectrum) và phổ độ lợi (gain spectrum) của EDFA có lõi pha Ge.

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

+ Chọn lựa các bước sóng có độ lợi gần bằng nhau. WDM làm việc ở dải sóng băng C (1530 - 1565 nm). Trong dải bước sóng này chọn 40 bước sóng làm bước sóng công tác của WDM. Các bước sóng này có độ lợi gần bằng nhau

+ Công nghệ cân bằng độ lợi: dùng bộ cân bằng (equalizer) hấp thụ bớt công suất ở bước sóng có độ lợi lớn và bộ khuếch đại để tăng công suất của bước sóng có độ lợi nhỏ.

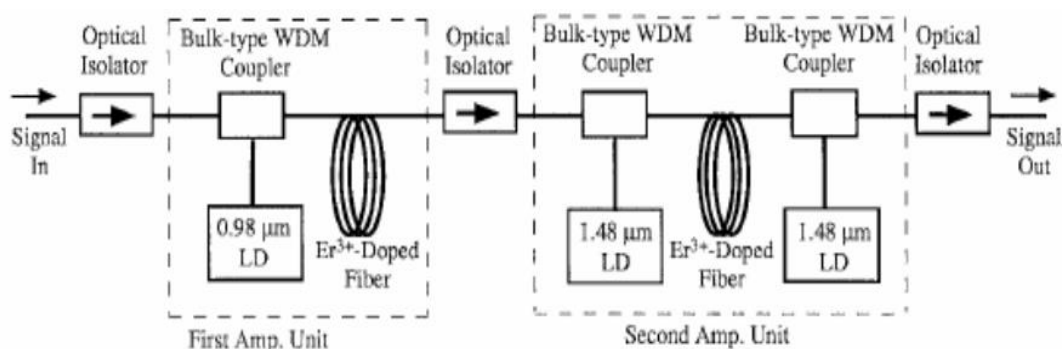
+ Thay đổi thành phần trộn trong sợi quang: dùng sợi quang trộn thêm nhôm, photpho nhôm hay flo cùng với erbium sẽ tạo nên bộ khuếch đại có băng tần được mở rộng và phổ khuếch đại bằng phẳng hơn.

Ngoài ra, phổ độ lợi 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 (1530-1565 nm). Tuy nhiên, độ lợi của sợi pha tạp 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 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 (isolator) và bộ ghép (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 5.1.

Bảng 5.1. Bảng so sánh EDFA hoạt động trong băng C và băng L

Tính chất	Băng C	Băng L
Độ lợi	Cao hơn	Nhỏ hơn khoảng 3 lần
Phổ độ lợi	Ít bằng phẳng hơn	Bằng phẳng hơn
Nhiều ASE	Thấp hơn	Cao hơn



Hình 5.2 Cấu hình của một bộ khuếch băng L làm bằng phẳng độ lợi trong khoảng bước sóng 1570nm - 1610nm với thiết kế hai tầng

Hình 5.2 trình bày cấu trúc của một bộ khuếch đại băng L làm bằng phẳng độ lợi trong khoảng bước sóng 1570nm - 1610nm với thiết kế hai tầng [3]. Tầng đầu tiên được bơm ở bước sóng 980nm và hoạt động như một bộ EDFA truyền thống (sợi quang dài 20 - 30nm) có khả năng cung cấp độ lợi trong khoảng bước sóng 1530 - 1570 nm. Ngược lại, tầng thứ hai có sợi quang dài 200m và được bơm hai chiều sử dụng laser 1480nm. Một bộ isolator 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 độ lợi phẳng trên một vùng băng thông rộng trong khi vẫn duy trì mức nhiễu thấp.

5.1.2. Nhiễu trong bộ khuếch đại quang

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 ngõ ra. Do đó, tại ngõ ra của bộ khuếch đại công suất quang thu được Pout bao gồm cả công suất tín hiệu được khuếch đại và công suất nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại ASE (Amplified Spontaneous Emission).

$$P_{out} = G.P_{in} + P_{ASE} \quad (5.1)$$

Ảnh hưởng của nhiễu đối với bộ khuếch đại quang được biểu diễn bởi hệ số nhiễu NF (Noise Figure), mô tả sự suy giảm tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR (Signal to Noise Ratio) do nhiễu của bộ khuếch đại thêm vào. Hệ số NF được cho bởi công thức sau:

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (5.2)$$

Trong đó, SNRin, SNRout là tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại.

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.

Ngoài bốn thông số kỹ thuật chính được nêu ở trên, các bộ khuếch đại quang còn được đánh giá dựa trên các thông số sau:

- + Độ nhạy phân cực (Polarization sensitivity) là sự phụ thuộc của độ lợi của bộ khuếch đại vào phân cực của tín hiệu.
- + Ảnh hưởng của nhiệt độ đối với độ lợi và băng thông độ lợi.
- + Xuyên nhiễu (crosstalk).

5.1.3. Ứng dụng của bộ khuếch đại quang

Khuếch đại quang được ứng dụng trong các hệ thống truyền dẫn quang như các bộ khuếch đại nhằm làm tăng công suất của tín hiệu quang trên đường truyền, khắc phục suy hao do sợi quang và các mối hàn, nối xảy ra trên đường truyền. Tùy theo vị trí lắp đặt, các bộ khuếch đại trên tuyến truyền dẫn quang được chia làm ba loại: