

CHẾ TẠO VÀ KHẢO SÁT KHUẾCH ĐẠI QUANG SỬ DỤNG TRONG HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG SỢI

Inverstigation and manufacturing optical amplifiers using in light-wave communication systems

Phạm Văn Hội, Đặng Xuân Cự, Hà Xuân Vinh, Phạm Hồng Tuấn

Tóm tắt

Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu chế tạo và khảo sát thực nghiệm các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp đất hiếm (EDFA) và khuếch đại quang bán dẫn(SOA). Sau các phần giới thiệu chung về nguyên lý khuếch đại quang và các tính toán thông số của khuếch đại quang, chúng tôi trình bày các kết quả khảo sát thực nghiệm các bộ khuếch đại quang đã chế tạo. Các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Er với nồng độ $>2500\text{ppm}$ cho hệ số khuếch đại $G>30\text{dB}$, thông số tạp âm $NF<4.5\text{ dB}$, băng thông khuếch đại $\Delta\lambda>40\text{ nm}$ và công suất ra bão hoà $P^{\text{sat}}>15\text{ dBm}$ trong khi đó khuếch đại quang bán dẫn cho $25\text{dB}>G>20\text{ dB}$, $NF>7\text{dB}$, băng thông khuếch đại $\Delta\lambda<30\text{ nm}$ và $P^{\text{sat}}<4.5\text{ dBm}$. Độ ổn định theo nhiệt độ môi trường và nhiễu do phản xạ quang của EDFA tốt hơn rất nhiều so với SOA. Các bộ khuếch đại này hoàn toàn đáp ứng các tiêu chuẩn của ITU cho mạng truyền thông cáp quang WDM.

Từ khoá: Khuếch đại quang sợi EDFA, khuếch đại quang bán dẫn SOA, Sợi quang pha tạp ion đất hiếm nồng độ cao.

Abstract

This paper presents some new the experimental results of study and manufacturing the EDFA and SOA, which has been done in Vietnam in recent time. After brief introduction of optical amplification we show the experimental result obtained from EDFA with high Er-ion concentration ($N_{Er}>2500\text{ppm}$) and SOA based on InGaAsP with $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ antireflection thin films. The main parameters of optical amplifiers are: $G>30\text{dB}$; $NF<4.5\text{ dB}$, $P^{\text{sat}}>15\text{dBm}$ and $25\text{dB}>G>20\text{dB}$; $NF>7\text{ dB}$, $P^{\text{sat}}<4.5\text{dBm}$ for EDFA and SOA, respectively. These optical amplifiers are suitable for using in fiberoptic coarse-WDM networks according to ITU recommendations.

Key words: Erbium doped fiber amplifiers, Semiconductor optical amplifiers, High concentration Rare-earth doped fibers.

1. MỞ ĐẦU

Công nghệ chế tạo vật liệu quang tử đã có những thành tựu nổi bật trong thập niên vừa qua đã cho phép chế tạo rất nhiều linh kiện và thiết bị quang tử kiểu mới và mục tiêu ứng dụng đầu tiên của chúng là hệ thống thông tin quang sợi. Điển hình của sự ứng dụng nhanh các kết quả nghiên cứu từ phòng thí nghiệm ra thực tiễn là các bộ khuếch đại sợi quang pha tạp đất hiếm. Năm 1987 các nhà khoa học Nhật

đại quang của nguyên tố Erbium trong thủy tinh SiO_2 tại vùng bước sóng 1530-1570 nm được khẳng định trong phòng thí nghiệm th đến năm 1990 đã có những bộ khuếch đại sợi quang pha tạp Erbium (EDFA) trong dải sóng 1550 nm đưa vào sử dụng trong các tuyến truyền thông cáp quang đường trục, và đến nay EDFA là một thành phần không thể thiếu của các mạng truyền thông cáp quang trên toàn thế giới. Khi có các bộ EDFA hoạt động

ổn định trong mạng cáp quang, một công nghệ truyền thông quang mới đã được hình thành là công nghệ ghép nhiều bước sóng quang mang thông tin trong một sợi quang (WDM) [1]. Khuếch đại quang sợi pha tạp đất hiếm có nhiều ưu điểm nổi bật, tuy nhiên chúng cũng có một số nhược điểm nhất định như: kích thước cồng kềnh, các linh kiện quang sợi dễ gãy trong khi vận hành... Vì vậy gần đây việc nghiên cứu EDFA có xu hướng giảm độ dài sợi pha tạp và tiến tới chế tạo khuếch đại quang trong màng dẫn sóng (EDWA) có kích thước cỡ vài centimét. Việc phát triển khuếch đại quang loại mới cần phải nghiên cứu các tính chất vật lý của vật liệu thủy tinh pha tạp nồng độ cao và các cấu hình khuếch đại quang phù hợp. Gần đây, các nghiên cứu chế tạo và ứng dụng khuếch đại quang trên cơ sở bán dẫn (SOA) đang phát triển do các ưu điểm về kích thước và dễ phát triển mạch quang tử hợp. Phải nói rằng SOA đã được nghiên cứu từ những năm 70 của thế kỷ XX, tuy nhiên với trình độ công nghệ chế tạo lúc đó SOA có nhiều nhược điểm khó khắc phục như: hệ số tăng ích thấp ($G < 16$ dB), thông số tạp âm NF khá cao ($NF > 10$ dB) và công suất ra không ổn định, vì vậy chúng đã không được đưa vào sử dụng trong tuyến thông tin quang khi đã có EDFA. Hiện nay công nghệ chế tạo màng mỏng chống phản xạ đã đạt trình độ rất cao, có thể kiểm soát được độ dày màng đến cỡ nanomet, vì vậy việc chế tạo SOA đã có tiến bộ rất lớn, các bộ SOA hiện nay đã có băng tần khuếch đại lớn hơn 30 nm, hệ số khuếch đại $G > 20$ dB và thông số tạp âm NF đã giảm xuống dưới 7 dB.

Trong bài này chúng tôi trình bày một số kết quả nghiên cứu chế tạo và khảo sát ứng dụng khuếch đại quang sợi pha tạp Er (EDFA) và khuếch đại quang bán dẫn (SOA) trong tuyến thông tin quang. Nội dung của bài này gồm hai phần: nghiên cứu chế tạo EDFA với các nồng độ ion Er khác nhau và nghiên cứu chế tạo và khảo sát SOA trong vùng 1300nm – 1550 nm nhằm ứng dụng trong mạng thông tin cáp quang. Kết quả trình bày trong bài này thuộc đề tài nghiên cứu triển khai cấp nhà nước KC-01-22 và cấp Viện KH&CNVN trong thời gian 2002-2005.

2. Các loại khuếch đại quang sử dụng trong tuyến thông tin quang

Hiện nay đã có hai loại khuếch đại quang trực tiếp, thứ nhất là khuếch đại quang sợi quang pha tạp các ion đất hiếm (Earth Doped Fiber Amplifier: REDFA) và hai là khuếch đại quang bán dẫn (Semiconductor Optical Amplifier: SOA). Mỗi loại khuếch đại quang có ưu điểm và nhược điểm nhất định. Chúng ta có thể đi qua các ưu điểm và nhược điểm của các khuếch đại quang như sau:

* Khuếch đại quang sợi REDFA có ưu điểm rất rõ ràng là hoạt động ổn định trong mạng cáp quang với thông số tạp âm n (NF < 5 dB), hệ số khuếch đại cao ($G > 30$ dB) và ghép nối dễ dàng với các linh kiện quang và đặc biệt hữu ích trong mạng thông tin quang ghép nhiều bước sóng (WDM) do băng tần khuếch đại quang khá rộng ($\Delta\lambda > 30$ nm). Chính nhờ có khuếch đại quang sợi mà công nghệ truyền đa bước sóng đã được phát triển rất nhanh trong thập niên vừa qua. Công nghệ truyền đa bước sóng WDM trên một sợi quang đã mang lại hiệu quả rất lớn trong mạng truyền thông cáp quang như: tăng dung lượng của đường truyền thông tin lên đến Terabit/giây trong một tuyến thông tin quang mà không phải đầu tư thêm đường truyền dẫn, ghép tách các kênh thông tin quang hoàn toàn bằng các linh kiện quang do đó giảm tạp âm, giảm thiết bị quản lý mạng và giảm chi phí cho bảo dưỡng thiết bị trên tuyến.

Nhược điểm cơ bản của khuếch đại quang sợi pha tạp ion đất hiếm là không phù hợp vùng sóng từ 1250 đến 1650 nm. Sợi quang SiO₂ pha tạp đất hiếm chỉ có thể sử dụng để khuếch đại quang trong vùng sóng 1525-1650 nm khi pha tạp Erbium. Sợi quang thủy tinh “nặng” ZBLAN pha tạp Praseodym khuếch đại bước sóng 1320 – 1350 nm, tuy nhiên điểm hạn chế của hai loại thủy tinh có nhiệt độ nóng chảy khác nhau (SiO₂ có nhiệt độ nóng chảy 1800°C, ZBLAN có nhiệt độ nóng chảy 850°C) chưa thực hiện được. Chúng ta chưa tìm thấy ion pha tạp nào trong thủy tinh SiO₂ có thể khuếch đại quang ở vùng sóng 1350-1525 nm. Tuy đã có hiệu ứng khuếch đại ánh

sáng trong sợi quang theo nguyên lý tán xạ Raman và Brillouin kích thích có thể khuếch đại quang trong dải phổ này, nhưng hiệu ứng khuếch đại cần có nguồn bơm rất lớn vào trong sợi quang dài hàng chục kilô-mét và độ ổn định cũng chưa được cải thiện, do đó đến nay các bộ khuếch đại này sử dụng rất hạn chế trong tuyến thông tin quang thực. Nhược điểm thứ hai của khuếch đại quang sợi là cần độ dài sợi quang khá lớn (vài mét đến vài chục mét), do đó thiết bị khá cồng kềnh, khó tương thích với các mạch quang tổ hợp.

* Khuếch đại quang bằng bán dẫn (SOA) trên nguyên lý sóng chạy đã được nghiên cứu từ những năm 60 của thế kỷ XX khi hệ thống thông tin quang mới bắt đầu phát triển. Tuy nhiên hạn chế lớn nhất của khuếch đại quang bán dẫn là độ tạp âm lớn và độ ổn định thấp so với khuếch đại quang sợi. Thông số tạp âm cao ($NF > 10$ dB) và ổn định thấp có nguyên nhân từ nguyên lý khuếch đại sóng chạy trong vùng hoạt tính của bán dẫn. Vì lý do trên nên khuếch đại quang bán dẫn rất ít đưa vào sử dụng trong tuyến thông tin quang trong thời gian qua. Khi kỹ thuật DWDM phát triển, con người muốn sử dụng tất cả các bước sóng trong dải 1250 – 1700 nm là dải có hệ số suy hao quang và có tán sắc thấp của sợi quang SiO₂. Các ion đất hiếm không thể khuếch đại quang trong dải sóng 1350-1525 nm, do đó các nhà nghiên cứu cố gắng cải thiện các thông số của khuếch đại quang bán dẫn để sử dụng trong các bước sóng này. Ưu điểm nổi bật của khuếch đại quang bán dẫn là có thể chế tạo các môi trường khuếch đại quang bằng vật liệu bán dẫn tại bất kỳ bước sóng nào trong vùng 1000 – 1700 nm. Ưu điểm thứ hai của khuếch đại quang bán dẫn là kích thước nhỏ gọn ($1 \times 0,07 \times 0,05$ mm³) do đó rất dễ dàng phát triển thành các mạch quang tổ hợp kích thước nhỏ gọn và điều khiển đơn giản. Trong những năm gần đây, số lượng các công trình nghiên cứu về khuếch đại quang bán dẫn tăng rất nhanh do các nguyên nhân sau: công nghệ chế tạo vật liệu bán dẫn đã có bước tiến rất lớn về hướng vi mô (bán dẫn giếng lượng tử, dây lượng tử, kích thước nano...) và có các tính chất quang vượt trội hơn hẳn các vật

liệu cũ; công nghệ chế tạo linh kiện bán dẫn đã rất hoàn thiện với độ chính xác cực cao do đó chất lượng linh kiện đã có bước tiến nhà vọt; nhu cầu mở rộng vùng khuếch đại quang cho các vùng sóng chưa sử dụng tầng vọt; kỹ nghệ quang tổ hợp ngày càng phát triển và đã có rất nhiều linh kiện quang được tổ hợp trong một mạch kích thước nhỏ. Trong thời gian tới hướng phát triển các bộ phát quang và khuếch đại quang sẽ có xu hướng giảm kích thước và dễ điều khiển. Một nhược điểm của khuếch đại quang bán dẫn cần được xem xét là bản tần khuếch đại của vùng hoạt tính bán dẫn phức tạp cố định không đồng đều trong dải 30 nm 70 nm, tuy nhiên nhược điểm này sẽ được khắc phục khi công nghệ quang tổ hợp được phát triển.

Khuếch đại ánh sáng trực tiếp bằng pha xạ cưỡng bức trong môi trường đảo mật độ cơ chế vật lý giống như laser, tuy nhiên khuếch đại quang không yêu cầu có phản hồi quang bằng gương phản xạ trong bộ cộng hưởng như laser. Để có trạng thái đảo mật độ phân bố trong môi trường khuếch đại, ta luôn cần có các nguồn bơm (quang hoặc điện). Các thông số quan trọng nhất của khuếch đại là: Hệ số khuếch đại G , băng tần khuếch đại $\Delta\nu$ (hoặc $\Delta\lambda$), thông số tạp âm NF (Noise Figure) và công suất ra bão hòa P của bộ khuếch đại. Hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại phụ thuộc vào tần số (hoặc bước sóng) của tín hiệu quang tới và cường độ chùm sáng nội tại các vị trí trong bộ khuếch đại quang. Công thức để tính hệ số khuếch đại G của bộ khuếch đại cho cả hai trường hợp SOA và EDFA là:

$$G = \frac{P_{ra}}{P_{vào}} \quad (1)$$

trong đó P_{ra} là công suất quang lối ra của khuếch đại và $P_{vào}$ là công suất quang đi vào khuếch đại. Giả sử L là độ dài của bộ khuếch đại, hệ số khuếch đại G liên hệ với hệ số tăng ích $g(\omega)$ bằng biểu thức:

$$G(\omega) = \exp[g(\omega)L] \quad (2)$$

Trong thực tế $G(\omega)$ được tính bằng đơn vị decibel (dB) theo công thức:

$$G \text{ (dB)} = 10 \log_{10} (P_{ra} / P_{v\mu o}) \quad (3)$$

Băng tần khuếch đại $\Delta\nu_A$ tại điểm giữa cực đại $G(\omega)$ liên hệ với băng tần tăng ích $\Delta\nu_g$ là:

$$\Delta\nu_A = \Delta\nu_g \left(\frac{\ln(2)}{\ln(G_0/2)} \right)^{1/2} \quad (4)$$

trong đó $G_0 = \exp(g_0 L)$. Công suất ra bão hoà của bộ khuếch đại P_{ra}^S được xác định khi G giảm xuống 2 lần (3 dB) so với G_0 ($G = G_0/2$), ta có:

$$P_{ra}^S = \frac{G_0 \ln(2)}{G_0 - 2} P_s \quad (5)$$

trong đó P_s là công suất bão hoà cực đại của bộ khuếch đại tính theo lý thuyết.

Tỷ lệ tín hiệu trên tạp âm SNR của khuếch đại quang được xác định thông qua thông số tạp âm (Noise Figure - NF) theo biểu thức sau:

$$NF = (SNR)_{v\mu o} / (SNR)_{ra} \quad (6)$$

trong đó SNR được tính theo công suất điện được tạo thành bởi chuyển đổi tín hiệu quang thành dòng điện. Nhìn chung NF phụ thuộc vào các thông số của bộ thu quang, đặc biệt là tạp âm nhiệt trong bộ thu quang. Để đơn giản cho việc phân tích NF của bộ thu quang lý tưởng, ta coi tạp âm shot là chủ yếu trong bộ thu quang. Các tính toán lý thuyết cho thấy NF có giá trị nhỏ nhất là 2 (3 dB), vì vậy kết luận chung là: khuếch đại quang không cải thiện tạp âm của tín hiệu, và tạp âm nói chung sẽ tăng lên 2 lần (3 dB) [8].

Các thông số của khuếch đại quang cần được khảo sát trên thực tế do chúng phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố của bản thân bộ khuếch đại.

3. NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VÀ KHẢO SÁT KHUẾCH ĐẠI QUANG SỢI PHA TẠP Er (EDFA) TẠI VIỆT NAM

3.1. Chế tạo khuếch đại quang sợi pha tạp Er nồng độ thấp ($N_{Er} < 1000$ ppm)

Cấu hình khuếch đại được lựa chọn là cấu hình bơm đồng hướng hoặc ngược hướng với

bước sóng bơm 980nm. Sợi quang pha tạp là sợi quang đơn mode chuẩn (micron) với phần pha tạp tại trung tâm dẫn quang có đường kính 2,5 đến 4 μ m. Nồng độ Erbium pha tạp trong lõi sợi lựa chọn trong khoảng 500 – 1000 ppm, là tỷ lệ pha tạp 600 hoặc 1000 nguyên tử erbium trên một triệu phân tử SiO₂. Sợi pha tạp này hiện đang sử dụng rộng rãi các bộ khuếch đại quang trên tuyến thông tin. Độ dài của sợi pha tạp Er từ 10 mét đến 1 mét để khảo sát hệ số tăng ích và tạp âm. Laser bơm có công suất cực đại 120 mW bước sóng 980 +/- 4nm và có thể điều chỉnh được công suất phát xạ thông qua dòng bơm cho laser. Chúng tôi đã tập trung nghiên cứu chế tạo các bộ điện tử như: bộ cấp dòng, kiểm soát nhiệt độ cho laser bơm với độ chính xác cao (dòng bơm có sai số < 1%, nhiệt độ laser điều chỉnh được trong dải 10 – 40°C với độ chính xác +/- 0,1°C), các bộ chuyển đổi thông số công suất, dòng bơm, nhiệt độ, công suất ra của bộ khuếch đại theo đúng chuẩn của các bộ hoạt động trên tuyến thông tin.

Kết quả thu được như sau:

- Hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại: $G = 20 - 26$ dB
- Thông số tạp âm của bộ khuếch đại: $NF < 7$ dB
- Công suất ra bão hoà của tín hiệu khuếch đại: $10 \text{ dBm} > P_{sat} > 4 \text{ dBm}$
- Độ ổn định của bộ khuếch đại qua công suất $\Delta P < -30$ dB

3.2. Chế tạo khuếch đại quang sợi EDF với nồng độ Er cao ($N_{Er} > 2000$ ppm)

Xu hướng chế tạo các bộ EDFA nhỏ gọn và tiên tiến chế tạo các bộ khuếch đại quang tích phân dạng màng dẫn sóng đang là hướng nghiên cứu chủ yếu của các phòng thí nghiệm thông tin quang trên thế giới. Để giảm chi phí dài bù đắp khuếch đại quang, điều cần thiết là phải tăng nồng độ các ion đất hiếm trong thu tinh. Khi tăng nồng độ pha tạp đất hiếm trong thu tinh, các hiệu ứng tụ đám (clustering) sẽ tăng theo và dẫn tới quá trình dập tắt phát xạ

quang hoặc quá trình hấp thụ trên mức kích thích (excited state absorption-ESA) sinh ra phát xạ chuyển đổi ngược (Up-conversion emission). Các hiệu ứng nêu trên gây bất lợi cho khuếch đại quang trong vùng hồng ngoại 1550nm như: gây thêm tạp âm cho tín hiệu, giảm hệ số tăng ích, tăng độ bất ổn định về nhiệt trong vùng khuếch đại.... Tuy nhiên, các nghiên cứu gần đây cho thấy khi pha tạp thêm Al_2O_3 với nồng độ thích hợp vào SiO_2 và lựa chọn công nghệ chế tạo thủy tinh thích hợp (Sol-gel chẳng hạn), chúng ta có thể hạn chế các hiệu ứng bất lợi của sợi quang pha tạp đất hiếm nồng độ cao. Các nghiên cứu của chúng tôi tập trung vào khảo sát các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Er với nồng độ > 2000 ppm song song với khảo sát thủy tinh pha tạp đất hiếm Er, Nd, Pr... nồng độ cao chế tạo bằng kỹ thuật Sol-gel đang tiến hành tại Viện Khoa học Vật liệu. Sợi quang pha tạp nồng độ cao là sợi quang đơn mode chuẩn với cấu trúc 9/125 micron, pha tạp Er trong lõi sợi đường kính 2 micron với nồng độ ion Er > 2500 ppm. Hấp thụ quang tại bước sóng 1550 nm khi không có bơm là 12 dB/mét (so với loại sợi pha tạp nồng độ thấp < 1000 ppm chỉ là 4dB/mét). Nguồn bơm cho khuếch đại quang sợi là laser bán dẫn đơn mode phát xạ ở bước sóng 980 nm với công suất quang ra thay đổi được từ 0 đến 150 mW. Các kết quả bước đầu cho thấy, chỉ cần sợi quang độ dài 2 - 2,5 mét, bơm bằng bước sóng 980 nm với công suất 80 mW, hệ số khuếch đại quang đã đạt ngang với EDFA nồng độ thấp có độ dài 12 mét và bơm với công suất 100 mW.

Độ dài tối ưu của sợi quang pha tạp Er = 2500 ppm để chế tạo khuếch đại quang được lựa chọn trong khoảng 1,8 – 6 mét với công suất bơm 35-150 mW tại bước sóng 980 nm.

Kết quả thu được như sau:

- Hệ số khuếch đại : $G > 30$ dB
- Công suất quang ra bão hoà $P_m > 17$ dBm (>50 mW)
- Thông số tạp âm $NF = 3,4 - 4,5$ dB với EDFA có độ dài 6 m.

Đây là một kết quả rất có ý nghĩa về mặt công nghệ chế tạo khuếch đại quang sợi đáp ứng được yêu cầu của mạng thông tin quang hiện đại.

3.3. Khảo sát tạp âm của khuếch đại quang;

Tạp âm (Noise figure) của bộ khuếch đại quang sợi là một thông số rất quan trọng trong việc sử dụng khuếch đại quang trong hệ thống thông tin quang. Tạp âm của khuếch đại quang tính theo decibel được xác định bằng biểu thức sau:

$$NF (dB) = 10 \log_{10} (P_{ase} / hvGB_o + 1/C) \quad (7)$$

trong đó P_{ase} là công suất phát xạ huỳnh quang tự phát khuếch đại (ASE) ra khỏi bộ khuếch đại trong băng tần B_o , h là hằng số Planck, ν là tần số quang của tín hiệu và G là hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại [2]. Công suất ASE trong băng tần B_o rất khó đo trực tiếp do nó nằm ngay trong tín hiệu quan được khuếch đại, vì vậy chúng tôi đã sử dụng phương pháp làm phẳng đường cong ASE và tính trung bình giá trị tín hiệu này. Phương pháp này rất tiện lợi là chỉ cần một thiết bị đo phổ quang (Optical Spectrum Analyzer OSA) có thể xác định khá chính xác NF của bộ khuếch đại, hơn nữa phương pháp này có thể sử dụng ngay trong tuyến thông tin quang đang hoạt động.

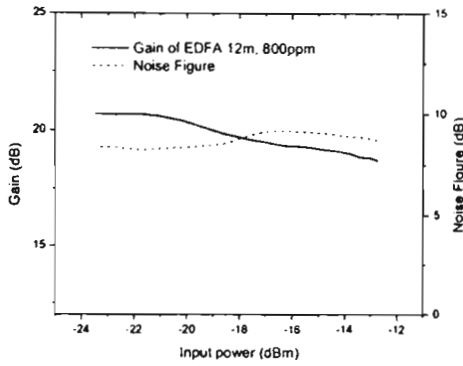
Các kết quả nghiên cứu cho thấy, tạp âm của các bộ khuếch đại phụ thuộc vào băng tần khuếch đại tại các bước sóng trung tâm 1530 nm và 1560 nm do phổ phát xạ ASE của khuếch đại quang sợi không đồng đều trong vùng 1525-1580 nm. Ngoài ra, tạp âm của bộ khuếch đại còn phụ thuộc vào công suất bơm của khuếch đại, mặc dù sự phụ thuộc này không lớn. Thông số tạp âm của bộ khuếch đại bơm đồng hướng với công suất bơm khoảng 80 mW tại bước sóng 980 nm, độ dài sợi pha tạp 16 mét với nồng độ ion Er 800 ppm nằm trong khoảng 7-8 dB và phụ thuộc vào tần số tín hiệu quang khuếch đại. Với EDFA có nồng độ pha tạp 2500 ppm và độ dài 6m, NF chỉ còn 3,2-4 dB (xem hình 1)

3.4. Băng tần tăng ích của khuếch đại quang pha tạp Er nồng độ thấp

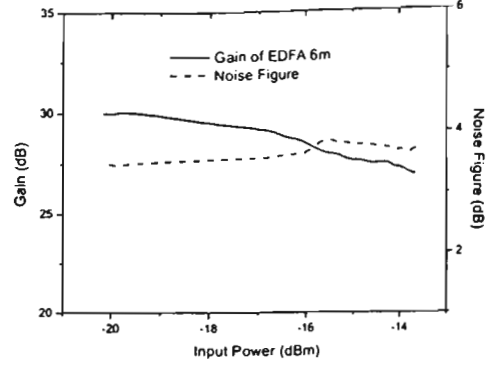
Các nghiên cứu về tăng ích của khuếch đại quang pha tạp Er đã chế tạo cho thấy băng tần khuếch đại của thiết bị có độ rộng trong khoảng 1525 – 1565 nm (40 nm) với hệ số tăng ích chênh lệch từ vùng 1530 đến

1560nm là 3 dB khi bơm đạt chế độ bão hoà. Hình 2.a trình bày phổ ASE của các bộ khuếch đại có nồng độ pha tạp và độ dài sợi khác nhau: đường (a) cho EDFA có nồng độ Er là 800 ppm và độ dài 12 m; đường (b) cho

EDFA nồng độ 2500 ppm và độ dài 2 đường (c) cho EDFA nồng độ 2500 ppm độ dài 6 m. Phổ ASE phù hợp với bản khuếch đại của thiết bị.



a

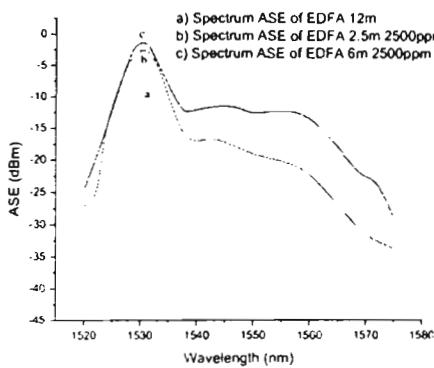


b

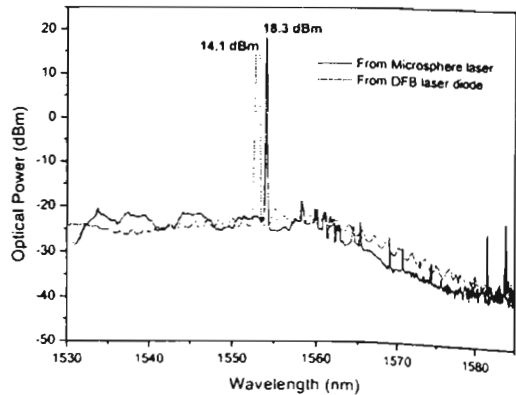
Hình 1. Hệ số khuếch đại G và thông số tạp âm NF của hai bộ khuếch đại quang EDFA có nồng độ pha tạp Erbium khác nhau: a) EDFA nồng độ 800 ppm, độ dài sợi 12 m có thông số tạp âm $NF > 7,5$ dB, $G = 22$ dB; b) EDFA nồng độ 2500 ppm, độ dài sợi 6 m có thông số tạp âm $NF = 3,4$ dB, $G = 30$ dB.

Thông thường xác định băng tần khuếch đại từ phổ ASE khi ta tính công suất P_{ASE} giảm đi một nửa (-3dB). Thực nghiệm cho kết quả với nồng độ Er tăng, băng tần khuếch đại của EDFA mở rộng về vùng sóng dài. Hình 2.b trình bày phổ khuếch đại tín hiệu quang của bộ EDFA có nồng độ Er = 2500 ppm và độ dài 6m khi công suất tín hiệu lối

vào từ hai laser tín hiệu khác nhau với công suất quang lối vào $P_{in} = -7$ dBm. Khi đi nhiều bước sóng mang thông tin trong quang (kỹ thuật WDM – Wavelength Division Multiplexing) các tín hiệu quang sẽ được khuếch đại đồng thời và để cung cấp năng lượng đủ, chế độ bơm cần đạt bão hoà trọn vẹn sợi pha tạp [6].



a



b

Hình 2. Phổ ASE của các bộ EDFA với nồng độ Er khác nhau bơm bằng bước sóng 980 nm công suất 100 mW và tín hiệu quang được khuếch đại trong EDFA có nồng độ Er = 2500 ppm và độ dài sợi là 6 mét.

4. NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VÀ KHẢO SÁT KHUẾCH ĐẠI QUANG BÁN DẪN (SOA)

Khuếch đại quang bán dẫn dựa trên nguyên lý khuếch đại ánh sáng bằng hiệu ứng phát xạ cưỡng bức Einstein trong bán dẫn có cấu trúc chuyển tiếp p-n. SOA có cấu trúc giống như laser bán dẫn không có buồng cộng hưởng, vì vậy chế tạo SOA thường sử dụng chip laser bán dẫn có phủ màng chống phản xạ trên hai gương phản xạ của buồng cộng hưởng. Chất lượng của SOA sóng chạy phụ thuộc rất nhiều vào hệ số phản xạ ở hai mặt. Các SOA chất lượng tốt thường đòi hỏi sự

phản xạ ở hai mặt rất thấp ($R < 10^{-4}$) [6]. Với các chip bán dẫn thông thường hệ số phản xạ cố hữu ở các bề mặt khá lớn ($R \sim 32\%$). Chính vì vậy để có thể chế tạo các SOA ta phải tiến hành chống phản xạ cho các bề mặt này. Kỹ thuật chống phản xạ thường được dùng hiện nay là kỹ thuật phủ màng nhiều lớp với các chiết suất khác nhau. Giả sử có một chất bán dẫn có chiết suất n_{sc} và chiều dày d được phủ nhiều lớp như trên hình 4. Lớp thứ r có chiết suất n_r và độ dày d_r . Ánh sáng bước sóng λ_0 tới bề mặt với góc tới θ . Khi đó miền phủ d lớp này được đặc trưng bởi phương trình ma trận:

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \left[\prod_{r=1}^n \begin{pmatrix} \cos \delta_r & (i \sin \delta_r) / \eta_r \\ i \eta_r \sin \delta_r & \cos \delta_r \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_{sc} \end{pmatrix} \tag{8}$$

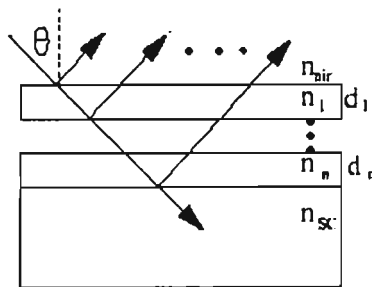
Trong đó: $\delta_r = \frac{2\pi n_r d_r \cos(\theta)}{\lambda}$ là độ dày pha, ta đặt $\eta_{TE} = n \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} \cos(\theta)$,

và $\eta_{TM} = n \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} / \cos(\theta)$. Với $Y = \frac{C}{B}$ ta thu được hệ số phản xạ:

$$R = \left(\frac{\eta_{air} - Y}{\eta_{air} + Y} \right)^2 \quad \text{và} \quad d_r = \frac{\lambda_o}{4n_r} \tag{9}$$

Nếu phủ màng đơn lớp, phương trình ma trận trên được tính rất dễ dàng. Với mỗi chất bán dẫn (ví dụ như GaAs có $n_{sc}=3.4$) thì chiết suất chất phủ được tính $n_1 = \sqrt{n_{sc} n_{air}} = 1,84$

và dễ thấy $d_1 = 178$ nm đối với bước sóng $\lambda_o = 1310$ nm). Tuy nhiên với kỹ thuật phủ màng đơn lớp này thì hệ số phản xạ chỉ bằng 0 với bước sóng $\lambda = \lambda_o$ và góc tới $\theta = 0$.



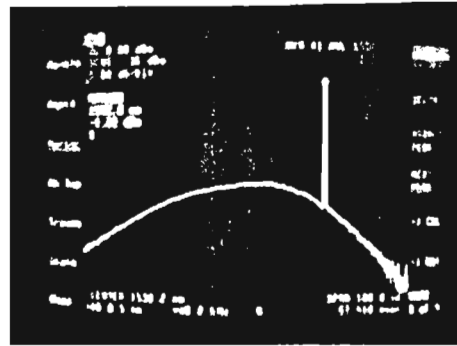
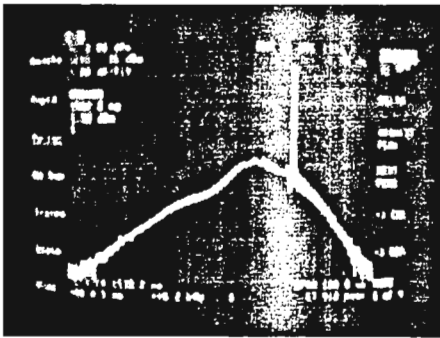
Hình 3: Cấu trúc màng phủ nhiều lớp lên một chất bán dẫn chiết suất n_{sc} , chiều dày d_i

Với kỹ thuật phủ màng sử dụng các lớp phủ chống phản xạ TiO_2/SiO_2 thì giá trị của R có thể đạt được 10^{-5} . Nếu sử dụng kỹ thuật

phủ màng này kết hợp với chế tạo các mặt nghiêng Brewster (7°) thì có thể giảm sự phản xạ các mặt xuống gần như bằng 0. Chúng tôi

đã tiến hành phủ màng chống phản xạ cấu trúc 2 lớp TiO_2/SiO_2 sử dụng kỹ thuật bốc hơi bằng chùm điện tử trong chân không có trợ giúp bằng chùm plasma. Màng điện môi chế tạo bằng phương pháp bốc hơi chân không bằng chùm điện tử có trợ giúp bằng plasma có độ bền cao hơn hẳn các màng chế tạo bằng các phương pháp khác. Kết quả thu được đã giảm hệ số phản xạ trên vật liệu InP-InGaAsP xuống còn 2.10^{-3} . Tuy nhiên chất lượng màng chống phản xạ chế tạo trong nước chưa đáp ứng được yêu cầu của bộ khuếch đại SOA chất lượng cao.

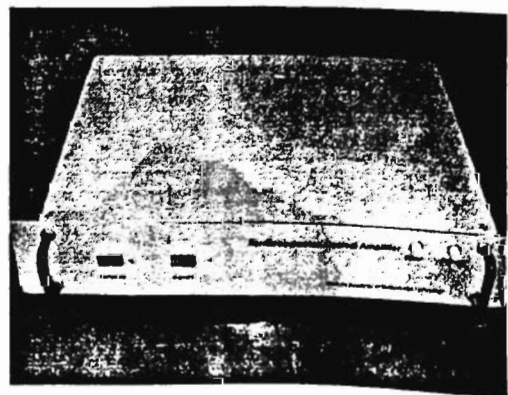
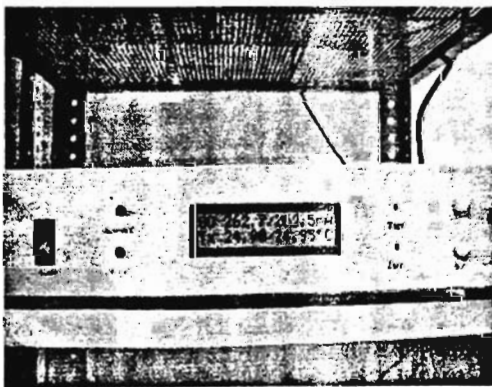
Hình 4 trình bày đặc trưng ASE và hiệu suất của hai khuếch đại SOA sóng chạy chế tạo tại Việt nam trên bán dẫn InP-InGaAsP có màng chống phản xạ hai lớp SiO_2/TiO_2 với công suất tín hiệu vào $P_{in} = -21$ dBm. Băng tần khuếch đại của SOA tại vùng sóng 1550nm là 30 nm bước sóng trung tâm là 1540 nm. Thông số tạp âm NF đo được là 7 dB với tín hiệu vào trong khoảng -16 dBm đến -24 dBm công suất lỗi ra bão hoà của khuếch đại SOA là 4 dBm.



Hình 4: Phổ ASE và tín hiệu khuếch đại của SOA kiểu sóng chạy InP-InGaAsP có hệ số khuếch đại $G=20$ dB, $NF=7$ dB. Bên trái: Hệ số phản xạ 2.10^{-3} , bên phải: hệ số phản xạ 6.10^{-4}

Chúng tôi có nhận xét khuếch đại SOA có thông số tạp âm NF lớn (7 dB) và công suất ra tương đối nhỏ (<4 dBm) so với EDFA. Tuy nhiên SOA là linh kiện rất nhỏ gọn và dễ bảo trì Nguồn nuôi cho bộ SOA cũng giống như nguồn nuôi cho laser bơm của EDFA với độ chính xác về dòng bơm < 1% dòng nuôi và chính xác về nhiệt độ để laser < 0,2°C.

Các bộ khuếch đại quang EDFA và SOA trong vùng sóng 1300 nm và 1550 nm chế tạo trong khuôn khổ đề tài KC-01-22 và đề tài cấp bộ tiến hành trong thời gian 2001-2005 đã được thử nghiệm truyền WDM 2 bước sóng tại Phòng thí nghiệm thông tin quang sợi và tại Trung tâm thông tin công nghệ cao Bộ quốc phòng.



Hình 5. Khuếch đại quang EDFA và SOA chế tạo tại Việt nam trong khuôn khổ đề tài KC-01-22

5. KẾT LUẬN

Chế tạo khuếch đại quang trên cơ sở sợi quang pha tạp đất hiếm và vật liệu bán dẫn đã bắt đầu được phát triển tại Việt nam. Các kết quả nghiên cứu chế tạo EDFA và SOA với các thông số tăng ích $G > 20$ dB, tạp âm $NF < 7$ dB và có độ ổn định cao về nhiệt độ và công suất ra bảo hoà cho thấy các bộ khuếch đại này có thể sử dụng trong các tuyến thông tin quang độ dài trung bình ($L < 500$ Km) và dung lượng vừa ($2,5$ Gbp/s). Kết quả nghiên cứu về tạo màng chống phản xạ cấu trúc 2 lớp trên vật liệu InP-InGaAsP, về hấp thụ và phát xạ laser ngẫu nhiên của sợi quang pha tạp Er nồng độ cao có ý nghĩa về khoa học cơ bản và rất có ích cho việc thiết kế chế tạo khuếch đại quang.

Lời cảm ơn: Tập thể tác giả xin chân thành cảm ơn Chương trình KC-01, Viện KH&CNVN đã cho phép tập thể nghiên cứu thực hiện 01 đề tài cấp Nhà nước và 02 đề tài nghiên cứu triển khai cấp Bộ (2000-2002 và 2002-2003) để hoàn thành công trình nghiên cứu này. Chúng tôi xin chân thành cảm ơn Gs. Roberto Coisson thuộc Đại học Parma Italia đã giúp đỡ chúng tôi một số vật tư quý hiếm để thực hiện đề tài này.

Tài liệu tham khảo

1. Emmanuel Desurvire. Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and Applications, Ch.5, JohnWiley&Sons Pub. (1994)
2. Pham Van Hoi, Thai Van Lan, Hoang Xuan Nguyen, Bui Huy, Vu Duc Thinh, Hoang Phuong Chi. *Modified curve fitting method for noise figure measurement of Er^{3+} fiber optical amplifiers*. Proc.of III Internat. Workshop IWOMS'99 "Trends in Materials Science & Technology", (1999), pp.273-276
3. Pham Van Hoi, Hoang Cao Dung, Vu Duc Thinh, Phung Huu An, Hoang Xuan Nguyen and Thai Van Lan. *The Opto-electronic research for development of Fiberoptic CATV network in Vietnam*. Proc. Of 18th Conf. of CAFEO, (2000), pp. 173-175
4. Pham Van Hoi, Vu Duc Thinh, Tran Thi Cham, Chu Thi Thu ha, Vu Viet Tien, Alex Lang.

Investigation and manufacturing the Er^{3+} doped optical fiber amplifiers for fiber optical communication networks in Vietnam. Proc. of REV'02, (2002), pp. 229-232

5. Micheal J. Connelly. *Windband Semiconducto Optical Amplifier Steady-State Numerical Model*. IEEE Journal of Quantum Elect. v.37, No.3 (2003)
6. Pham Van Hoi, Ha Xuan Vinh, Chu Thi Thu Ha, Nguyen Thu Trang. *Investigation and manufacturing photonic active devices for communications and sensors in Vietnam*. Proc of International Symposium on Photonics and Applications, Hanoi 5-8 April, (2004), pp.100-105
7. Phạm Văn Hội, Đặng Xuân Cự, Hà Xuân Vinh, Phạm Hồng Tuấn. *Nghiên cứu chế tạo khuếch đại quang trên cơ sở bán dẫn và sợi quang pha tạp sử dụng trong thông tin quang sợi*. Tuyển tập báo cáo Hội nghị ứng dụng Vật lý toàn quốc lần II, (2004), tr.322-325
8. Govind P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*, Ch.8 JohnWiley&Sons Pub. (1997)

Về các tác giả :

Phó giáo sư – Tiến sĩ Phạm Văn Hội, tốt nghiệp Đại học Tổng hợp quốc gia Azerbaijan (Liên xô cũ) năm 1974 chuyên ngành Vật lý chất rắn, tiến sĩ chuyên ngành Laser bán dẫn và quang -điện tử tại Viện Vật lý Lebedev, Viện Hàn lâm khoa học Nga (Liên xô cũ) năm 1986. Nhận học hàm Phó giáo sư năm 1996. Từ năm 1975 đến năm 1993 PGS.TS. Phạm Văn Hội công tác tại Viện Vật lý, Viện Khoa học Việt nam và từ 1993 đến nay công tác tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ Việt nam. Hiện nay PGS.TS. Phạm Văn Hội là Trưởng ban điều hành Phòng Thí nghiệm Trọng điểm Quốc gia về Vật liệu và Linh kiện điện tử và là Phân viện trưởng Phân viện Quang học, Quang phổ và Quang tử thuộc Viện Khoa học Vật liệu. Lĩnh vực nghiên cứu chính là vật liệu và linh kiện quang tử ứng dụng trong thông tin và cảm biến quang, bao gồm cả các vật liệu quang tử kích thước nano. PGS.TS. Phạm Văn Hội là tác giả và đồng tác giả của hơn 130 công trình đã công bố trong và ngoài nước về lĩnh vực quang tử và ứng dụng.