

에르븀 첨가 광증폭기의 파장에 따른 이득 특성 측정 및 분석*

김향균 · 박서연 · 이동호 · 박창수*

한국전자통신연구소 광파통신연구실

*한국전자통신연구소 전송방식연구실

(1996년 10월 11일 받음)

실리카가 주 매질인 에르븀 첨가 광증폭기의 1545-1557 nm의 파장 영역에서 이득 스펙트럼 특성과 EDFA를 여러 번 통과하면서 누적되는 특성을 측정, 분석하였다. 파장에 따른 이득 차이가 최소인 이득은 에르븀 첨가 광섬유의 길이가 정해지면 단일하게 결정되고(G_0), 이득 불균일의 정도는 동작 이득이 G 일때 G_0-G 에 거의 비례하며 비례상수는 0.1~0.2 dB/dB의 값을 갖는다. 에르븀 첨가 광증폭기를 여러 번 지날 때 파장에 따른 이득불균일 및 신호대 잡음비 불균일은 계속 누적되며, 그 양은 통과한 EDFA의 수에 비례한다. 입력 신호광 세기 -20 dBm/cm., 이득 21 dB에서 최적화된 EDFA를 제작하여 파장에 따른 이득 및 잡음지수 특성을 측정 한 결과, EDFA 12회 통과 후 파장에 따른 이득차는 5 dB, 잡음지수 차는 3 dB의 값을 나타냈다.

I. 서 론

에르븀첨가 광증폭기(이하 EDFA)는 고이득, 저잡음, 낮은 편광 의존도등 광증폭기로서의 여러 가지 장점을 지니고 있어 그 개발이 단기간에 획기적으로 이루어 졌으며, 현재는 장거리 광전송시스템에 필수적으로 이용되고 있다. 파장분할다중 기술을 이용하는 다채널 광전송시스템에서는 EDFA의 이득 및 잡음지수 특성과 함께 파장에 대한 균일한 특성이 중요하다. 그러나 증폭매질인 에르븀 이온의 흡수 및 방출특성이 파장에 따라 다르기 때문에 파장에 대한 증폭 및 신호대 잡음비 특성이 다르며 이는 EDFA를 파장분할다중방식의 광전송 시스템에 이용하는데 있어서 큰 단점이 되고 있다.^[1] 또한 에르븀 이온이 homogeneous broadening의 특성을 지니고 있기 때문에 EDFA의 여기광 세기, 입력 신호광 세기가 달라질 때 파장에 따른 이득 특성이 변화된다. 특히 장거리 광전송의 경우 여러 개의 EDFA를 지나면서 이러한 특성은 계속 누적되어 광전송시스템에 심각한 영향을 주게 된다. 따라서 견고한 광전송시스템을 구성하기 위해서는 EDFA의 파장에 대한 이득 특성 및 이들이 여러 개의 EDFA를 지날때 유도되는 누적된 특성을 정확히 알고 이를 바탕으로 하여 전체 광전송시스템을 구성하여야 한다.

본 논문에서는 실리카가 주 매질인 에르븀 첨가 광섬유를 이용하여 구성된 EDFA의 1545-1557 nm영역의 파장에 대한 이득 평탄 특성을 에르븀 첨가 광섬유의 길이, 입력신호광 세기, 여기광 세기 등을 변화시켜가며 측정하였고, recirculating loop을 구성하여, EDFA를 여러 번 지날 때의 특성을 측정 분석하였다.

II. 실험 장치 및 실험 방법

신호광원으로는 세 개의 DFB LD와 하나의 파장가변 LD를 4×4광섬유 방향성 결합기로 다중시켜 이용하였으며, 각각의 파장은 1545 nm, 1548.2 nm, 1553 nm, 1557 nm로 고정하여 1545 nm(1557 nm사이에서 EDFA의 파장에 따른 이득차(이하 이득 불균일) 특성을 측정하였다. 광섬유로 입사되는 신호광 세기는 광감쇠기를 이용하여 조절하였고, EDFA를 지난 신호광들의 이득 특성은 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였다. 또한 여러 개의 EDFA를 통과하였을 때의 특성을 관측하기 위하여 광섬유 recirculating loop을 구성하여 EDFA를 여러 번 지났을 때의 이득불균일 특성을 측정하였다.

Recirculating loop은 측정용 EDFA와 광감쇠기(Attenuator 2), 광섬유 delay line, 50:50광섬유 방향성 결합기, 그리고 acousto-optic modulator(AOM2)로 구성된다(그림 1).^[1] 신호광의 입력 및 증폭된 신호광의 출력은 광스위치로 조정되는데,

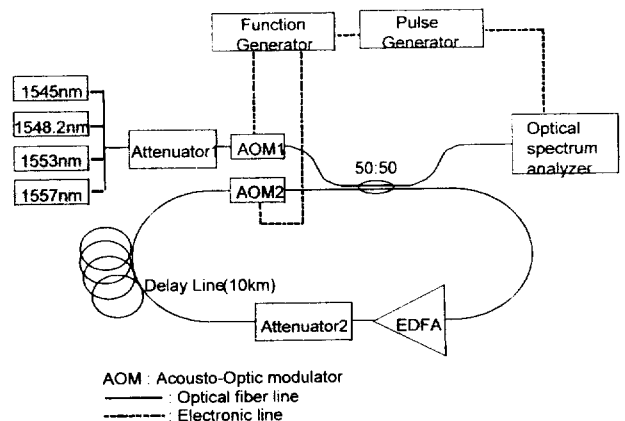


그림 1. 실험장치도

*본 연구는 HAN/BISDN과제의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구에 도움을 주신 이만섭 박사님과 이종현 실장님께 감사드립니다.

광스위치로는 acousto-optic modulator(AOM1과 AOM2)를 이용하였다. 광스위치 AOM1과 AOM2는 180°의 위상차이가 나는 구형파로 구동된다. AOM1이 닫혀있고 AOM2가 열려 있을 때는 loop안으로 신호광이 입사되는 상태이고, 반대의 경우는 입사된 신호광이 loop을 진행하고 일부는 출력되는 상태이다. 원하는 만큼의 증폭기를 통과한 후 신호광의 추출은 pulse generator에 의해 조정되는데, 광스펙트럼 분석기는 pulse generator의 출력이 high인 상태에서만 측정한다. Pulse generator는 function generator와 동기되어 있고 pulse width는 loop을 한 번 통과하는데 걸리는 시간(TL)보다 작아야 하며 pulse의 delay time(TD)은 원하는 만큼의 증폭기 통과회수에 TL을 곱한 시간과 같도록 조정한다. Loop의 이득 및 손실은 EDFA의 이득과 광감쇠기2(Attenuator2)에 의해 조정되고, EDFA로 입사되는 초기 신호광 세기는 광감쇠기1(Attenuator 1)에 의해 조절된다.

사용된 acousto-optic modulator의 extinction ratio는 약 25 dB이고, 삽입손실은 약 4 dB이다. 광스펙트럼분석기는 Advantest사(model AQ8383)의 제품을 이용하였다.

III. EDFA의 이득 스펙트럼 특성 측정 및 분석

본 절에서는 1545-1557 nm파장영역에서 EDFA의 이득불균일 특성을 신호광 세기, 여기광 세기, 에르븀 첨가 광섬유의 길이, 통과한 EDFA수를 변화시켜가며 측정하였다. EDFA는 순방향 여기구조를 하고 있으며, 여기광원은 980 nm LD이다.

그림 2는 EDFA에 포함된 에르븀 첨가 광섬유의 길이가 20 m와 30 m일 때 여기광 세기, 혹은 입력 신호광 세기를 변화시켜가며 측정한 평균 이득에 대한 이득 불균일 특성이 다. 이득 불균일은 주어진 에르븀 첨가 광섬유 길이에 대하여 평균이득에만 관계됨을 알 수 있다. 또한 동일한 이득 불균일을 나타내는 이득은 에르븀 첨가 광섬유의 길이에 따라 다르다. 광섬유의 길이가 결정될 때 이득 불균일이 최소가 되는 이득은 단일하게 결정되며, 그 양은 에르븀 첨가 광섬유의 길이에 비례한다.^[4,5] 본 실험에 사용한 에르븀 첨가 광섬유 20 m에 대하여 이득 불균일이 최소인 이득은 약 13 dB이고, 30 m에 대하여는 약 23 dB이다. 또한 그림 2에 나타난 결과로 볼 때 이득 불균일의 정도는 주어진 에르븀 첨가 광섬유에 대하여 동작이득(G)과 이득 불균일이 최소인 이득(G₀)과의 차에 비례한다. 이득 불균일을 DG라 할때 G₀-G에 대한 DG의 비례상수는 약 0.21 dB/dB였다. 그러나 이 값은 에르븀 첨가 광섬유의 길이와 이득에 따라 약간씩 차이를 보인다. 이득에 대한 이득 불균일 특성을 이론적으로 계산하였을 때^[5,6] G₀-G에 대한 DG의 비례상수는 0.1~0.2 dB/dB의 값을 나타냈다.

그림 3은 이득 불균일이 약 1.5 dB인 EDFA를 통과한 회수에 대하여 각 채널의 이득 및 신호대 잡음비 변화를 나타낸다. 첫번째 EDFA로 입사되는 입력 신호광 세기는 -19 dBm/ch.로 고정하였다. 또한 loop의 손실은 채널1의 이득과 같게 하였고 1530 nm에서의 높은 이득에 의하여 EDFA가 포화되는 것을 방지하기 위하여 매번 증폭기를 지날 때마다 필터를

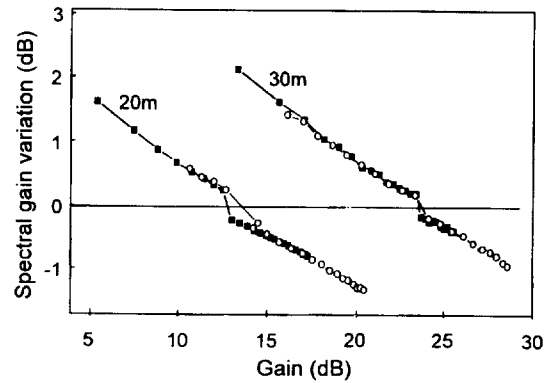


그림 2. 에르븀 첨가 광섬유 길이를 변화시키면서 측정한 이득에 대한 이득 불균일. 동그라미와 네모는 각각 여기광 세기와 입력신호광 세기를 변화시켜가며 측정한 값이다.

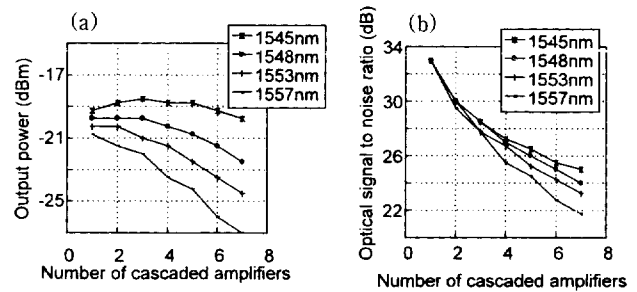


그림 3. EDFA 통과 회수에 대한 이득 불균일 특성 (a) 출력광 세기의 변화, (b) 신호대 잡음비의 변화

이용하여 1530 nm부분의 ASE성분을 제거하였다. EDFA를 7회 통과한 후 파장에 따른 출력광 세기의 변화량은 약 7.3 dB이고 신호대 잡음비의 변화량은 약 3.25 dB이다. 누적되는 이득 불균일은 EDFA 통과 회수에 거의 비례하며 이러한 특성은 파장에 따른 광학적 신호대 잡음비 변화량의 누적에 대해서도 동일하다. EDFA의 이득 평탄특성을 최적화하였을 때 7회 통과한 후 누적된 이득 불균일과 신호대 잡음비 불균일은 각각 1.2 dB와 1.1 dB였다.

그림 4는 증폭기 통과 회수에 따른 신호대 잡음비의 변화를 측정한 결과로서 각 증폭기로 입사되는 신호광 세기를 변화시켜가며 측정한 것이다. 이 때 EDFA로 입사되는 입력신호광 세기는 -20 dBm/ch.이고 증폭기의 잡음지수는 4.5 dB이다. 그림에서 실선은 이론^[7]에 의한 계산 결과이다. EDFA로 입사되는 입력신호광 세기가 같고, 증폭기의 잡음지수가 같을 때, n개의 EDFA를 통과한 후 증폭된 ASE의 누적에 의한 신호대 잡음비(optical SNR)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Optical SNR(dB)} = \text{Pin(dBm)} - \text{NF(dB)} - 10 \text{Log}(n) - 10 \text{Log}(\text{h}nB_0)$$

여기서 Pin, NF, h, n, B₀는 각각 증폭기로 입사되는 신호광 세기, 증폭기의 잡음지수, Plank 상수, 신호광의 주파수, 측정 광학 대역폭으로서 측정광학 대역폭은 실험값인 0.1 nm를 대입하였다. 이론과 실험결과에서 보면 n개의 증폭기를 지난 후 광학적 신호대 잡음비는 각 증폭기로 입사되는 신호광 세기에 비례하고 증폭기의 잡음지수에 역비례한다.

이러한 사항들을 고려하여 입력 신호광 세기 -20 dBm/ch., 이득 21 dB에서 최적화된 EDFA 3대를 제작하여 이들을 여

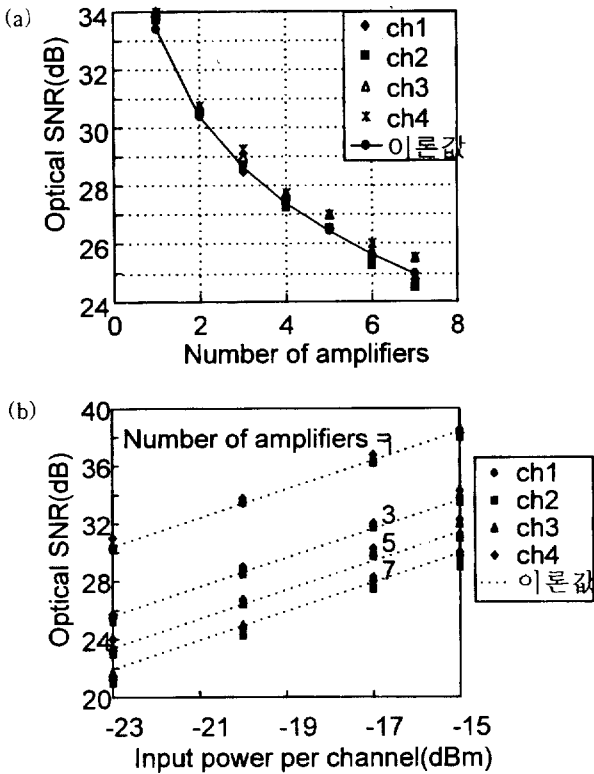


그림 4. EDFA 통과 회수에 대한 신호대 잡음비의 변화 (a) EDFA의 입력 신호광 세기를 -20dBm/ch. 로 고정하였을 때, (b) EDFA의 입력신호광 세기 변화에 대한 특성

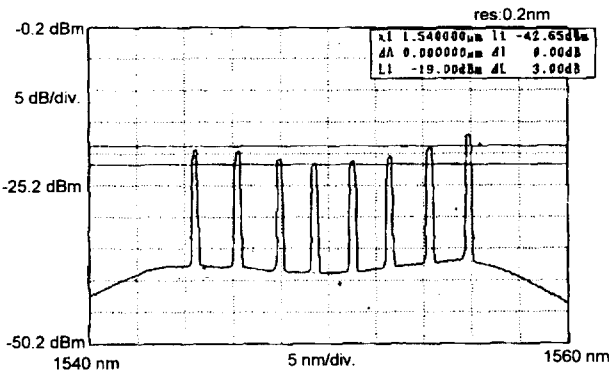


그림 5. 입력신호광 세기 -20 dBm/ch., 이득 21 dB에서 이득등화된 EDFA를 12회 통과한 후의 광스펙트럼

러 번 지날때의 이득 평탄특성을 recirculating loop을 이용하여 측정하였다. 신호광원으로는 1545-1557 nm대역에서 등간격으로 존재하는 8개의 광원을 다중화하여 이용하였다. 그림 5는 8개 채널의 입력 신호광에 대하여, EDFA를 12회 통과한 광스펙트럼이다. 각각의 EDFA가 0.5 dB 이내에서 이득 평탄화되었으며, 이를 여러 번 지날 때 누적되는 이득 평탄특성은 동일하였다. 12개의 EDFA를 통과한 후 채널간 출력광 세기

차는 약 5 dB, 광학적 신호대 잡음비 차는 약 3 dB이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다채널 광전송용 에르븀 첨가 광증폭기의 파장에 대한 이득 특성 및 이의 누적특성을 측정, 분석하였다. 신호광 파장영역은 1545-1557 nm이며, 에르븀 첨가 광증폭기를 여러 번 통과한 특성을 측정하기 위하여 광섬유 recirculating loop을 이용하였다

파장에 따른 이득 차이가 최소인 이득은 에르븀 첨가 광섬유의 길이가 정해지면 단일하게 결정되고(G_0), 이득 불균일의 정도는 동작 이득이 G 일때 G_0-G 에 거의 비례하며 비례상수는 0.1~0.2 dB/dB의 값을 갖는다. 이러한 에르븀 첨가 광증폭기를 여러 번 지날 때 파장에 따른 이득 불균일 및 신호대 잡음비 불균일은 계속 누적되며, 그 양은 통과한 EDFA의 수에 비례한다.

입력 신호광 세기 -20 dBm/ch., 이득 21 dB에서 최적화된 EDFA를 제작하여 파장에 따른 이득 및 잡음지수 특성을 측정 한 결과, EDFA 12회 통과 후 파장에 따른 이득차는 5 dB, 잡음지수 차는 3 dB의 값을 나타냈다.

참 고 문 헌

- [1] A. R. Chraplyvy, and et al, "1420-km transmission of sixteen 2.5 Gb/s channels using silica fiber based EDFA repeaters," IEEE Photo. Tech. Lett., **6**, 1371 (1994).
- [2] B. Clesca, D. Ronarc'h, D. Bayart, Y. Sorel, L. Hamon, M. Guibert, J. L. Beylat, J. F. Kerdiles, and M. Semenkoff, "Gain flatness comparison between erbium doped fluoride and silica fiber amplifiers with wavelength multiplexed signals," IEEE Phot. Tech. Lett., **6**, 509 (1994).
- [3] M. Semenkoff and M. Guibert, "Multiwavelength gain and signal/noise ratio excursion of cascaded hybrid silica and fluoride based amplifiers," Electron. Lett., **31**, 575 (1995).
- [4] D. Bayart, B. Clesca, L. Hamon, and J. L. Beylat, "Experimental investigation of the gain flatness characteristics for 1.55 μm erbium doped fluoride fiber amplifiers," IEEE Photo. Tech. Lett., **6**, 613 (1994).
- [5] S. Y. Park, H. K. Kim, C. S. Park, and S. Y. Shin, "Doped fiber length and pump power of gain-flattened EDFAs," Electron. Lett., **32**, 2161 (1996).
- [6] C. R. Giles and D. DiGiovanni, "Spectral dependence of gain and noise in erbium doped fiber amplifier," IEEE Photon. Technol. Lett. **2**, 797 (1990).
- [7] C. D. Chen, and et al, "A field demonstration of 10 Gb/s 360-km transmission through embedded standard (non-DSF) fiber cables," Proc. of OFC'94, San Jose, CA., 1994, pap. PD27

**Spectral gain variation characteristics of the silica-based erbium doped fiber amplifier
in the 1545-1557 nm wavelength region**

H. K. Kim, S. Y. Park, D. H. Lee and C. S. Park*

Lightwave Communications Section,

**Transmission Systems Section, Electronics and Telecommunications Research Institute,
P.O.Box 106, Taejon 305-600, Korea*

(Received : October 11, 1996)

Spectral gain variation characteristics of the silica-based erbium doped fiber amplifiers is investigated in the 1545-1557 nm wavelength region. For a given length of the erbium doped fiber, the gain(G_0) with minimum spectral gain variation is uniquely determined. The spectral gain imbalance DG is nearly proportional to the difference between G_0 and the operating gain(G) with the proportional constant of 0.1-0.2 dB/dB. For the gain flattened EDFA at the input power of -20 dBm/ch. and the gain of 21 dB, the output power and the optical signal to noise variations after 12 cascaded EDFAs were 5 dB and 3 dB, respectively.