

평균 밀도 반전 원리를 이용한 WDM용 EDFA의 설계 방법 및 특성

정희상 · 최현범 · 이문섭 · 이동한

충남대학교 물리학과

최봉수 · 문형명 · 이규형

대우통신 광통신연구소

안성준 · 장문종 · 박병석

전력연구원

(1999년 5월 6일 받음, 1999년 8월 28일 수정본 받음)

정확하게 EDF의 발광계수를 측정하는 방법을 개발하고 실제 제작된 광증폭기의 평탄한 이득 상태에서의 특성을 살펴보았다. 간단한 측정을 통해 원하는 증폭 이득에서 이득이 평탄한 EDFA를 간편하게 설계할 수 있는 방법을 제시하였다.

I. 서 론

여러 파장의 신호를 동시에 전송하는 파장분할 다중화(wavelength-division multiplexing: WDM)방법을 채용함으로써 최근 급격한 통신 용량의 증가 가능성을 보여 주고 있다.^[1,2] 이러한 장거리 WDM전송을 위해서는 에르븀첨가 광섬유증폭기(erbium-doped fiber amplifier: EDFA)가 넓은 신호 파장 대역에서 평탄한 이득을 가져야 하기에 이득 평탄화에 대한 연구가 활발해왔다. 더 넓은 이득 대역을 얻기 위하여 수동형 또는 능동형 이득 평탄 필터를 사용한 많은 결과들이 보고되었다.^[3-5] 하지만 가까운 시일 내에 실제로 설치될 시스템은 16 채널 정도로서, 높은 평균 밀도 반전에서 1540~1560 nm 대역을 사용할 가능성이 높다. 이 경우 별도의 이득 평탄 필터를 사용하지 않고도 평균 밀도 반전을 조절함으로써 0.2 dB 이내로 이득을 평탄화시킬 수 있다. 이러한 EDFA를 채용한 recirculating loop을 사용하여 8,000 km(100 EDFA 통과)의 초장거리 전송에서 좋은 이득 평탄도를 가질 수 있음을 보여주었다.^[6]

본 연구에서는 정확하게 EDF(erbium-doped fiber)의 발광계수를 측정함으로써 목적에 맞는 EDFA를 설계할 수 있는 방법을 제시하고, 또한 다양한 전송 조건에서 간단한 방법을 이용하여 쉽고 빠르게 이러한 이득 평탄화 된 EDFA를 제작할 수 있는 방법을 제시하였다.

II. 본 론

EDFA의 이득 스펙트럼은 일단이건 다단이건 중간에 특별한 손실 필터를 쓰지 않는 한 전체 이득과 EDF의 길이의 비율(G/L)에 의해 정해지는 평균 밀도 반전에 의해 결정된다.^[7,8] 다시 말하면 이득이 가장 평탄화 되는 정해진 평균 밀도 반전이 있으며, 이때의 G/L 은 이에 비례하므로 고정되고, 증폭기 사이

의 거리가 정해진 광전송 시스템의 경우(G 고정)에 가장 평탄한 이득을 주는 EDF의 길이 L 은 입력 신호 세기에 관계없이 하나로 결정된다. 이러한 원리를 바탕으로 EDFA를 설계하기 위해서는 EDF의 흡수계수와 발광계수를 정확히 측정해야만 제작 후의 증폭 이득과 평탄도를 정확히 예측할 수 있다. 흡수계수 측정의 경우는 큰 오차가 없고 있다고 하더라도 치명적이지 않다. 그러나 발광계수의 경우 100% 밀도 반전된 계수를 직접적으로 정확히 측정하기 어려우며, 오차가 있을 때 실제와 다른 이득 스펙트럼을 예상하게되는 문제가 있다. 발광계수를 측정하는 방법에는 흡수계수를 측정하여 구하고, McCumber theory에 의해서 발광계수를 구하는 간접적인 방법이 있다.^[9] 이 방법에 의하면 파장에 따른 발광 단면적 $\sigma_e(\nu)$ 와 흡수 단면적 $\sigma_a(\nu)$ 사이에는 $\sigma_e(\nu) = \sigma_a(\nu) \exp[\epsilon - h\nu/kT]$ 의 관계식이 성립하므로, 플랑크 상수 h , 볼츠만 상수 k , 온도 T 와 EDF의 에너지 준위 구조와 관련된 상수 ϵ 를 알면 발광계수를 구할 수 있다. 그러나 ϵ 값의 작은 변화에 대하여 발광계수가 민감하게 달라지며, 이 값을 정확히 알기도 어렵다. 특히, 근사적으로 ϵ 를 구하는 방법은 저온에서 EDF의 흡수계수를 측정해야하는 번거로운 점도 있어서 접근하기가 용이하지 않다. 다른 측정 방법에는 짧은 길이 높은 밀도 반전(~100%)에서 ASE(amplified spontaneous emission)를 측정하고, 한 파장에서 이득을 측정하여 보정 하는 방법^[10]이 있으나, 발광계수의 절대치가 정확도에서 문제가 있다.

본 연구에서는 EDFA의 이득 반응속도가 milli second 단위로 느리다는 특성을 이용하여 짧은 펄스를 이용한 time-domain 방법과 cut-back 방법을 겸용하여 정확한 발광계수를 측정하였다. 이를 위하여 1500 nm 대역에서 비교적 평탄한 스펙트럼을 갖는 broadband source를 광원으로 이용하였고, 25 KHz의 주파수(duty cycle 10%)를 갖도록 acousto-optic modulator(AOM)를 이용하여 광원의 세기를 변조하였다. 신호 이득이 크지 않은 짧은 길이의 EDF에 위의 광원을 입력하고

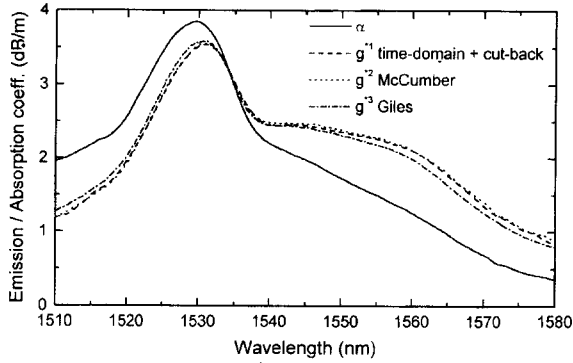


그림 1. EDF1의 발광계수(g^{*1} : Time-domain+cut-back 방법, g^{*2} : McCumber 방법, g^{*3} : Giles 방법) 및 흡수계수 (α).

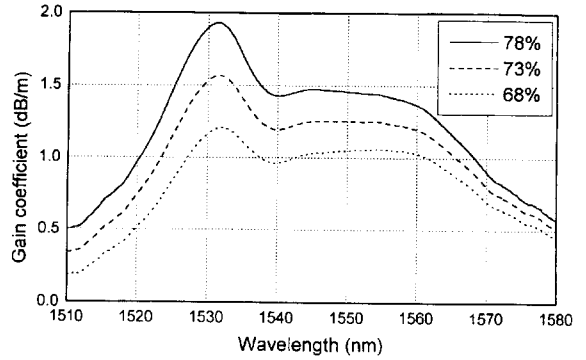


그림 2. 측정된 EDF1의 발광계수와 흡수계수를 이용하여 구한 서로 다른 밀도 반전에서 단위 길이 당 이득 스펙트럼.

100% 밀도 반전을 위하여 980 nm의 펌프 광원으로 충분한 세기로 펌핑 하였다. 입력이 ON일 때 측정된 출력은 신호 광원에 대한 이득과 ASE 잡음을 모두 포함하고 있어서, 입력이 OFF일 때 측정된 ASE를 제거함으로써 입력 신호의 이득만을 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 출력과 EDF의 길이를 줄여서 같은 방법으로 측정된 출력을 비교하여 발광계수를 구하였다. 이 방법은 입력 신호가 있는 경우의 ASE를 정확하게 측정하기 때문에 오차가 있다고 하더라도 평탄화 된 EDFA의 이득 스펙트럼의 모양이 변하지 않는 장점이 있다. 그림 1은 Er^{3+} 농도 300 ppm이고 Al의 몰농도 3%인 EDF1에 대하여 측정된 발광계수(g^{*1})와 흡수계수(α)를 보여주고 있다. 비교를 위하여 McCumber 방법(g^{*2})과 Giles 방법(g^{*3})으로 구한 발광계수를 같이 나타내었다. 이때, g^{*3} 는 5 cm의 짧은 EDF에서 측정된 ASE를 1530 nm에서 단파장 레이저로 측정된 발광계수 값으로 보정한 것이며, McCumber 방법으로 구한 값은 흡수계수와 time-domain + cut-back 방법으로 측정된 발광계수를 바탕으로 유추한 ϵ 값을 사용하였다. g^{*1} 과 g^{*2} 는 평균적으로 0.02 dB 이내의 차이를 보여 매우 잘 맞음을 알 수 있으나, g^{*3} 의 경우에는 1530 nm 보다 짧은 파장과 1550 nm 보다 긴 파장에서 다른 두 값과는 크기는 0.14 dB 정도의 차이가 남을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 Giles 방법으로 구한 발광계수는 절대치의 오차가 다른 두 방법보다 큼을 확인할 수 있다. 또한, 본 연구에서 사용된 방법을 통해서 유추한 ϵ 값을 사용할 경우에, McCumber 방법에 의한 발광계수가 time-domain + cut-back 방법의 결과와 일치하여 좋은 방법임을 알 수 있다. 그러나, 실제로 LN_2 의 온도 77 K에서 EDF의 흡수계수를 측정하여 ϵ 를 구하였을 경우에는, 논문에 보고된 바^[10]와는 달리, 상당한 차이를 보였으므로, EDF의 에너지 구조에 대한 정확한 정보가 없이 접근하기는 어려운 방법이라고 볼 수 있다.

측정된 결과를 바탕으로 평탄한 이득을 갖는 EDFA를 제작하여 time-domain + cut-back 방법의 신뢰성을 검증하였다. 그림 2는 이렇게 측정된 발광계수와 흡수계수를 이용하여 가장 평탄한 이득 스펙트럼을 가지는 밀도 반전에서의 단위 길이 당 이득 스펙트럼을 보여준다. 이 EDF1의 경우 밀도 반전이 약 73% 일 때 최적의 조건을 보여주며(1.25 dB/m) 만일 24 dB의 이득이 요구되는 시스템의 경우 19.2 m를 택하면 가장 평탄한 특성을 보일 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위하여

EDF1 19.2 m를 이용하여 가장 평탄한 이득을 갖도록 평균 밀도 반전을 조절하였다. 그림 3의 출력 스펙트럼으로부터 -14 dBm의 신호 입력과 31 mW의 펌프 세기에 대하여 23 dB의 이득을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 이 값을 EDF1 전후의 내부 값으로 바꾸기 위하여, WDM과 isolator의 삽입 손실 1 dB를 고려하면, 24 dB의 이득으로써 발광계수와 흡수계수의 스펙트럼으로부터 예측한 값과 정확하게 일치함을 알 수 있다.

직접적인 측정을 통하여 발광계수와 흡수계수를 구하면 평탄한 이득을 주는 밀도 반전을 알 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 많은 정보를 알 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 평균 밀도 반전 원리를 적용하면 발광계수와 흡수계수를 측정하지 않고도 쉽게 이득 평탄화된 EDFA를 설계 할 수 있다. 즉, 가장 평탄한 이득 스펙트럼을 주는 G/L 의 값이 고정된다는 원리를 이용하면, 임의의 길이(L)에서 이득 평탄화 되었을 때의 이득(G)이 정해지고 이로부터 어떠한 이득에서도 입력 신호 세기에 관계없이 가장 평탄한 이득 스펙트럼을 갖도록 설계 할 수 있다. 또한, 이득이 평탄하지 않더라도 그 때의 G/L 은 고정되므로 평탄도가 이득이 변화 할 때에 바뀌는 정도도 예상 할 수 있다. EDFA에서 순방향 펌핑의 경우 증폭된 신호 밑에 중첩되는 ASE 스펙트럼은 이득 스펙트럼의 모양과 같이 신호가 있는 한 파장에서 이득을 보정 해주면 넓은 파장에서의 이득을 한번에 측정하는 효과를 가질 수 있다. 이를 검증하기 위해 포화 신호를 한 파장에 놓고 probe 신호로 이득을 측정하였다. 포화 신호가 1550 nm 밴드 내에 있으면 이득 스펙트럼은 1540~1560 nm 대역에서 ASE 스펙트럼과 같

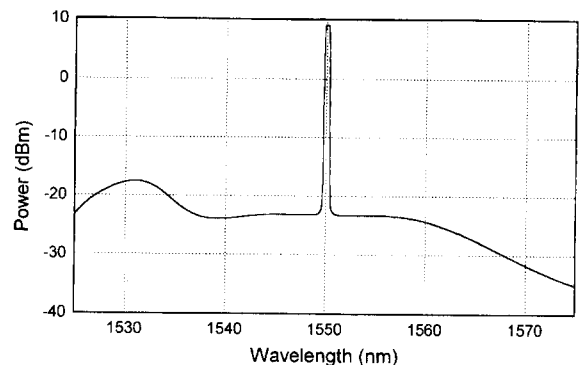


그림 3. EDF1 19.2 m로 이루어진 EDFA의 출력 스펙트럼.

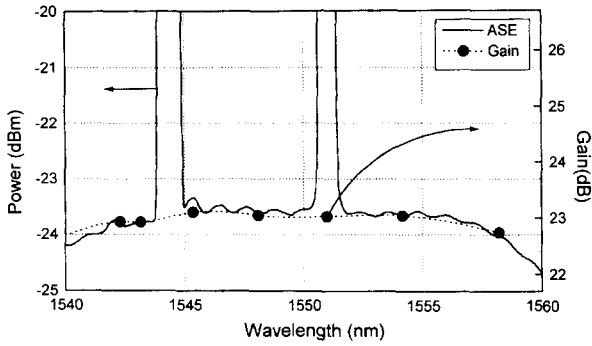


그림 4. 포화용 신호와 probe 신호를 이용하여 측정된 EDFA의 이득과 ASE 스펙트럼.

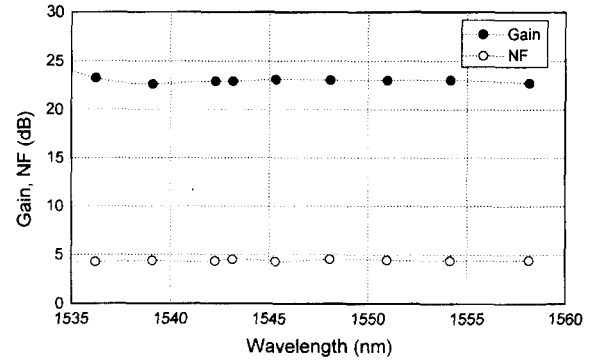


그림 6. 이득 평탄화 과정을 거쳐 설계 제작된 EDFA의 특성.

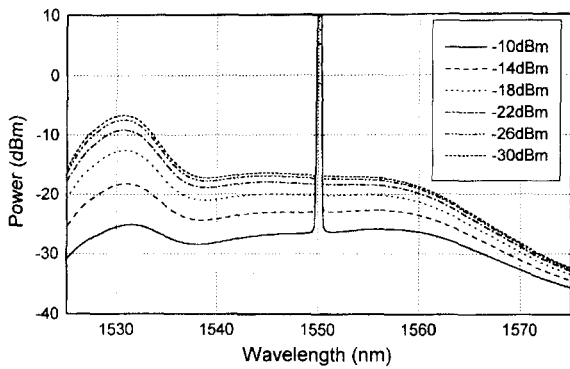


그림 5. 정해진 EDF2 길이에서 이득 스펙트럼의 신호 이득에 따른 변화.

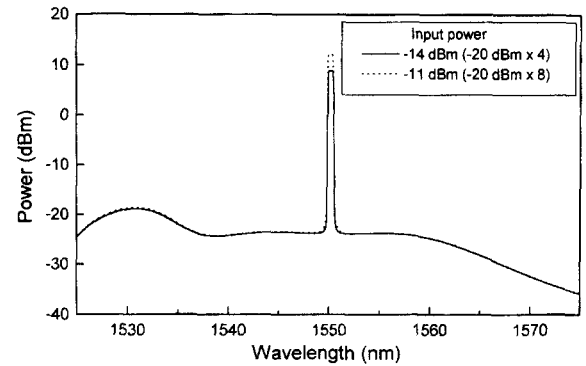


그림 7. 입력 신호 세기의 증가에 맞추어 증가된 펌프 세기에 따른 출력 스펙트럼.

은 형태를 가짐을 알 수 있었다. 그림 4는 포화용 신호(-15.2 dBm)로 사용된 DFB 레이저와 probe 신호(-20 dBm)로 사용된 fiber ring 레이저를 각각 1544.5 nm, 1551 nm에 놓고 측정된 출력의 ASE 스펙트럼과, 포화용 신호를 고정하고 probe 신호의 파장을 바꾸면서 측정된 이득을 비교한 것이며 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이때 EDF(EDF2)의 길이는 13 m이고 펌프광의 세기는 51 mW이다.

그림 5는 신호 이득을 변화시키면서 이득 스펙트럼의 변화를 보여준다. 펌프의 세기를 30 mW로 고정하고 입력 신호의 세기를 -30 dBm~-10 dBm으로 증가시키면서 출력을 측정하였으며, EDF(EDF3: Er³⁺ 농도 800 ppm, Al 몰농도 6%)의 길이는 7 m이다. 이 경우 EDF3의 길이와 980 nm LD의 세기를 고정시키고 입력 신호의 크기를 변화시켰으나 입력 신호의 크기를 고정시키고 펌프광의 세기를 변화시켜도 같은 효과를 가져올 수 있다. ASE 스펙트럼이 가장 평탄한 조건의 증폭 이득을 구하면 최적 평탄화를 가져오는 G/L 또는 평균 밀도 반전을 구한 것이며, 이 경우는 -18 dBm의 입력에 대하여 3.76 dB/m를 얻고, 이로부터 시스템에서 원하는 이득을 맞추기 위해서는 EDF 길이를 결정하면 된다.

그림 6은 이러한 과정을 거쳐서 설계 제작된 EDFA의 특성을 보여준다. EDF(EDF2)의 길이는 13 m이고 펌프 세기는 39 mW이며, 채널 당 -20 dBm의 세기로 4채널에 해당하는 입력 신호에서 이득은 23 dB인 경우이다. 1542~1557 nm에서 ±0.1 dB내로 이득이 평탄함을 보여주고 있으며 잡음지수도 전

영역에서 4.5 dB 보다 작았다. 채널 수가 증가하고 전체 입력 신호의 세기가 증가해도 평탄한 스펙트럼을 주는 이득은 고정되어 있기 때문에 펌프광의 세기만 증가시켜 정해진 이득만 맞추면 가장 평탄한 이득 스펙트럼을 유지시킬 수 있는데, 이를 8채널의 신호가 들어 왔을 때에 확인하였다. 그림 7은 이 EDFA에 4채널의 입력 신호가 들어오는 경우와 8채널 입력 신호가 들어오는 경우에 펌프 세기를 조절하여 이득이 일치하도록 하였을 때, 각각의 이득 스펙트럼이 정확하게 일치하는 것을 보여준다. 즉, 입력 신호가 -14 dBm에서 -11 dBm으로 증가하였을 경우에 펌프 세기를 39 mW에서 68 mW로 증가 시켜서 이득이 23 dB가 되도록 맞추었을 때 각각의 이득 스펙트럼은 정확하게 일치하였다. 이러한 설계 원칙은 일단 증폭기뿐 아니라 이단 증폭기에도 중간에 특별히 파장에 따라 다른 손실을 가져오는 필터를 쓰지 않는 경우 그대로 적용된다. 이렇게 설계 제작된 단일 EDFA와 단지 1530 nm 대역의 ASE만 제거시켜주는 필터를 사용하고 re-circulating EDFA loop을 이용하여 8,000 km(100 EDFA) 장거리 전송을 시도하였으며, 전송 후에도 5 dB 이득 대역이 10 nm 정도로서 좋은 특성을 보임을 확인 할 수 있었다.^[6]

III. 결 론

본 연구에서는 정확하게 EDF의 발광계수를 측정함으로써 목적에 맞는 EDFA를 설계할 수 있는 방법을 제시하였다. Time-domain + cut-back 방법은 펄스 신호를 이용함으로써

broadband source를 사용하더라도 ASE를 정확히 측정할 수 있고, duty cycle을 작게 하여 전체 입력 신호의 평균 세기를 줄이고, 이에 따라 100% 밀도 반전이 가능하며, cut-back 방법을 이용하므로 측정오차를 splice loss의 표준편차 정도인 0.02 dB 미만으로 줄일 수 있다. 또한, 평균 밀도 반전 원리를 이용하여 다양한 전송 조건에서 간단한 방법을 이용하여 쉽고 빠르게 이러한 이득 평탄화 된 EDFA를 제작할 수 있는 방법을 제시하였다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부가 지원하는 국가중점과제와 과학재단 광전자연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] A. K. Srivastava, Y. Sun, J. W. Sulhoff, C. Wolf, M. Zirngible, R. Monnard, A. R. Chraplyvy, A. A. Abramov, R. P. Espindola, T. A. Strasser, J. R. Pedrazzani, A. M. Vengsarkar, J. L. Zyskind, J. Zhou, D. A. Ferrand, P. F. Wysocki, J. B. Judkins and Y. P. Li, OFC'98, postdeadline

paper, PD10 (1998).
 [2] S. Aisawa, T. Sakamoto, M. Fukui, J. Kani, M. Jinno and K. Oguchi, OFC'98, postdeadline paper, PD11 (1998).
 [3] P. F. Wysocki, J. Judkins, R. Espindola, M. Andrejco, A. Vengsarkar and K. Walker, OFC'97, postdeadline paper, PD2 (1997).
 [4] J. Y. Pan, M. A. Ali, A. F. Elrefaie and R. E. Wagner, IEEE Photon. Technol. Lett. **7**, 1501 (1995).
 [5] H. S. Kim, S. H. Yun, H. K. Kim, N. Park and B. Y. Kim, IEEE Photon. Technol. Lett. **10**, 790 (1998).
 [6] 정희상, 이동한, 정윤철, 안성준, 조홍근, 한국광학회지 **9**, 181 (1998); H. S. Chung et al., (unpublished).
 [7] D. Lee, P. F. Wysocki, J. R. Simpson, D. J. DiGiovanni, K. L. Walker and D. Gasper, IEEE Photon. Technol. Lett. **6**, 1094 (1994); P. F. Wysocki, J. R. Simpson and D. Lee, IEEE Photon. Technol. Lett. **6**, 1098 (1994).
 [8] D. Lee, H. S. Chung, J. R. Simpson and D. J. DiGiovanni, J. Kor. Phys. Soc. **31**, 603 (1997).
 [9] W. J. Minscalco and R. S. Quimby, Opt. Lett. **16**, 258 (1991).
 [10] C. R. Giles, C. A. Burrus, D. J. DiGiovanni, N. K. Dutta and G. Raybon, IEEE Photon. Technol. Lett. **3**, 363 (1991).

Design of flat gain EDFAs based on inversion principle and their characteristics

Heesang Chung, Hyunbeom Choi, Munseob Lee and Donghan Lee
Department of Physics, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea

Bongsu Choi, Hyungmyung Moon and Kyuhaeng Lee
Daewoo Telecom, Fiber-Optic R&D Center, Incheon 404-250, Korea

Sungjun Ahn, Moonjong Jang and Byoungseok Park
Power System Lab., KEPRI, Taejon 305-380, Korea

(Received May 6, 1999, Revised manuscript received August 28, 1999)

We have developed a direct measurement method for gain coefficients of erbium-doped fiber amplifiers and used the coefficients for the design of flat gain EDFAs. Another simple method of designing EDFAs for WDM was realized as an application of inversion principle.