

## 2단 광섬유 증폭기를 이용한 효율적인 고출력 펄스 증폭

김병준<sup>†</sup> · 이한협 · 최현범 · 이동한

충남대학교 자연과학대학 물리학과 광전자 실험실  
Ⓣ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

김대연

국방과학 연구소 1부 9팀  
Ⓣ 645-600 경상남도 진해시 진해우체국 사서함 18호

권일범

한국표준과학연구원 산업측정표준부 비파괴계측그룹  
Ⓣ 305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 102호

(2002년 10월 17일 받음, 2003년 2월 7일 수정본 받음)

높은 출력의 peak 값을 갖는 광 펄스 신호를 얻기 위하여 2단 구조 EDFA를 구성하였다. EDFA의 첫 번째 단과 두 번째 단 사이에 대역통과 필터(band pass filter)를 삽입하여 소 신호 영역에서 높은 이득을 얻도록 하였다. 사용된 입력 펄스 신호는 100 μs의 주기, 10 ns의 펄스 폭과 1 mW의 peak 값을 갖고, 평균 출력이 소 신호 영역에 해당하는 낮은 파워를 갖는다. 구성된 EDFA를 사용하여 83 W의 고 출력 펄스 신호를 얻었다.

주제어 : two-stage EDFA, optical pulse amplification, bandpass filter.

### I. 서 론

광 섬유를 이용한 센서는 높은 신뢰성과 간단한 구조를 갖는 장점 때문에 넓은 지역이나 장거리 감시, 간단한 구조의 센서 시스템을 필요로 하는 곳에 활용 가치가 높아지고 있다. optical time-domain reflectometer(OTDR)나 광섬유 센서 등은 광 펄스 신호를 광섬유에 입사하여 되돌아오는 산란 광을 측정함으로써 광섬유의 절단 위치나 손실 위치를 찾아 내고, 구조물의 안전 감시를 위하여 구조물의 넓은 면적에 대한 변형률을 측정하기도 한다.<sup>[1]</sup> 넓은 지역이나 장거리를 감시하는 광섬유 센서는 광섬유 자체 손실 특성상 높은 출력의 광 펄스 신호를 필요로 한다. 높은 출력의 광 펄스 신호를 얻기 위하여 광섬유와 결합이 용이한 다단 구조의 EDFA가 많이 사용되고 있다.

EDFA의 첫 번째 단과 두 번째 단 사이에 대역통과 필터와 optical gate를 사용한 2단 구조의 EDFA를 구성하여 500 ns의 매우 빠른 주기와 picosecond 펄스 폭(pulse width)을 갖는 신호를 증폭한 실험이 발표되었다.<sup>[2]</sup> EDFA에 10 ps 펄스 폭을 갖는 신호를 입력하여 105 W의 peak 값을 얻었다. 위 논문은 대역통과 필터와 optical gate를 사용하여 구조가 복잡해지는 단점이 있다. 또 다른 연구에서 3단 구조의 EDFA를 사용하여 마지막 단 EDFA에 978 nm 파장의 Ti:Sapphire laser를 사용하여 1.5 W의 펌프 광을 여기하고, acousto-optic gate를 사용하여 10 ns의 펄스 폭과 1.5 mW의 peak 값을 가

지는 펄스 신호를 증폭하여 111 kW의 peak 값을 얻기도 하였다.<sup>[3]</sup> 그러나 이 실험의 경우에는 Ti:Sapphire laser와 acousto-optic gate를 사용하여 펄스 신호는 강하게 증폭시키지만 실험 구성이 복잡해지고 증폭기의 크기가 커진다는 단점이 있어 간단한 구조의 센서(sensor) 시스템에 사용되는 증폭기로는 적합하지 않다.

본 논문에서는 센서용으로 사용할 수 있도록 간단한 구조의 EDFA를 구성하였다. EDFA는 2단 구조를 사용하였고, nanosecond의 펄스 신호를 증폭하기 위해 optical gate 방법은 사용하지 않고 EDFA의 첫 번째 단과 두 번째 단 사이에 대역통과 필터만을 사용하여 EDFA 구조를 단순화 시켜 83 W의 고출력 펄스 신호를 얻었다.

### II. 실험 구성

그림 1은 광 펄스신호 증폭을 위한 실험 구성도이다.

1553 nm 파장의 distributed feedback laser diode(DFB LD) 광원과 LiNbO<sub>3</sub> 변조기(modulator)를 사용하여 펄스 신호를 만들었다. LiNbO<sub>3</sub> 변조기의 편광 특성으로 인해 변조기 앞에 편광 조절기(polarization controller)를 사용하여 펄스 신호의 extinction ratio가 최대가 되도록 하였다. 변조된 펄스 신호는 EDFA를 통해 증폭된다. 증폭된 펄스의 특성을 측정 하기 위하여 photo diode(PD)를 사용하여 oscilloscope로 측정하였다. 증폭된 펄스 신호는 높은 peak 값을 갖기 때문에 PD의 saturation을 막기위해 광 감쇠기(attenuator)를 사용하였다.

<sup>†</sup>E-mail: bjny75@hotmail.com

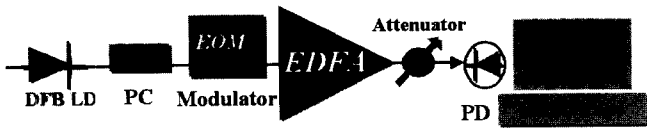


그림 1. 펄스 증폭을 위한 실험 구성도. DFB LD : distributed feedback laser diode, EDFA : erbium-doped fiber amplifier, EOM : electro optic modulator, PD : photo diode, PC : polarization controller.

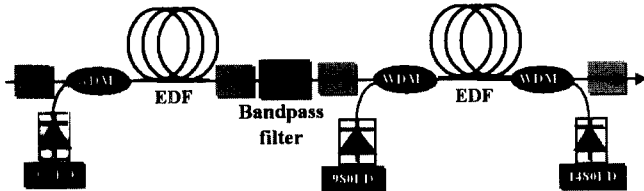


그림 2. 대역통과 필터를 사용한 2단 구조의 EDFA. EDF: erbium-doped fiber.

EDFA로 입력되는 펄스 신호는 100  $\mu$ s(10 kHz) 이하의 주기를 갖는다.  $Er^{3+}$  이온의 반응 시간(약 10 ms)보다 펄스 신호의 주기가 더 빠르기 때문에 EDFA로 입력되는 신호 크기는 펄스의 average power에 해당한다. 100  $\mu$ s의 주기, 10 ns의 펄스 폭과 1 mW의 peak 값을 갖는 입력 신호의 average power는 0.001 mW(-40 dBm)가 된다. 따라서 펄스를 증폭시킬 경우, EDFA를 소 신호 영역에서 이득이 크도록 설계해야 한다. 소 신호 입력에서 효과적으로 증폭시키기 위해 그림 2와 같이 EDFA를 구성하였다.

EDFA는 2단 구조로 첫 번째 단은 EDF-4.5 m( $Er^{3+}$  800 ppm)에 120 mW의 980 nm 펌프 광을 여기(pumping) 하였으며 두 번째 단은 높은 이득을 얻기 위해 EDF-11 m ( $Er^{3+}$  800 ppm)에 280 mW의 980 nm 펌프 광과 160 mW의 1480 nm 펌프 광을 양방향 여기(bi-directional pumping) 하였다. EDFA의 첫 번째 단과 두 번째 단의 입력 단과 출력 단에 사용된 isolator는 두 번째 단에서 발생한 amplified spontaneous emission (ASE)와 connector에 의해서 반사된 신호가 첫 번째 단으로 진행되는 것을 막아준다. 소 신호에서 더 높은 이득을 얻기 위해 EDFA의 첫 번째 단과 두 번째 단 사이에 대역통과 필터(3 dB bandwidth : 1.3 nm, insertion loss : 3 dB)를 사용하여 첫 번째 단에서 발생한 ASE가 두 번째 단으로 진행되는 것을 막도록 하였다.

### III. 실험 결과

그림 3은 EDFA의 첫 번째 단을 통과한 CW 신호의 스펙트럼을 나타낸다.

대역 통과 필터를 사용하지 않았을 경우 EDFA의 첫 번째 단에서 발생한 ASE와 증폭된 신호가 두 번째 단에서 함께 증폭 된다. 첫 번째 단에서 발생한 ASE와 증폭된 신호가 두 번째 단의 이득을 강하게 saturation 시킨다. 그러나 대역통과 필터를 삽입하게 되면 첫 번째 단에서 발생한 ASE를 제거하여 두

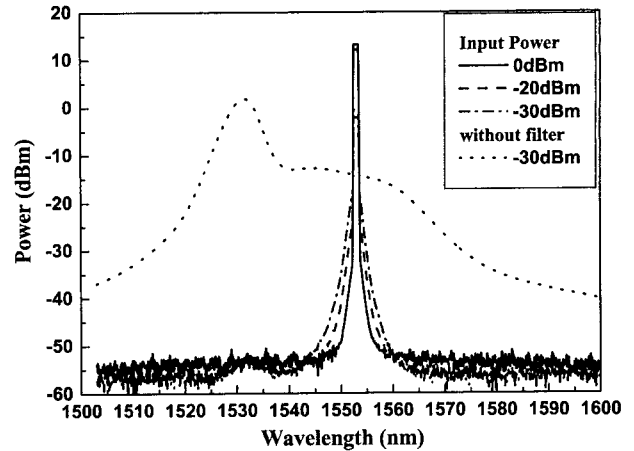


그림 3. EDFA의 첫 번째 단에서 대역통과 필터를 통과한 신호.

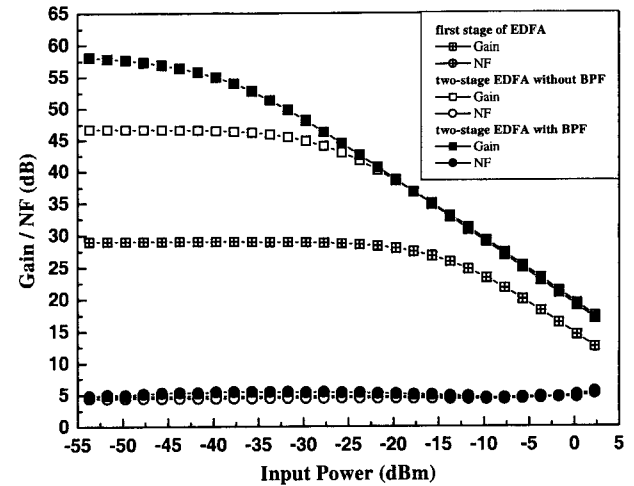


그림 4. 입력 신호에 따른 EDFA의 이득과 잡음지수. NF: noise figure, BPF: bandpass filter.

번째 단에서 입력신호만을 효율적으로 증폭시킬 수 있게 된다. 따라서 두 번째 단의 소 신호 영역 이득이 증가하게 된다.

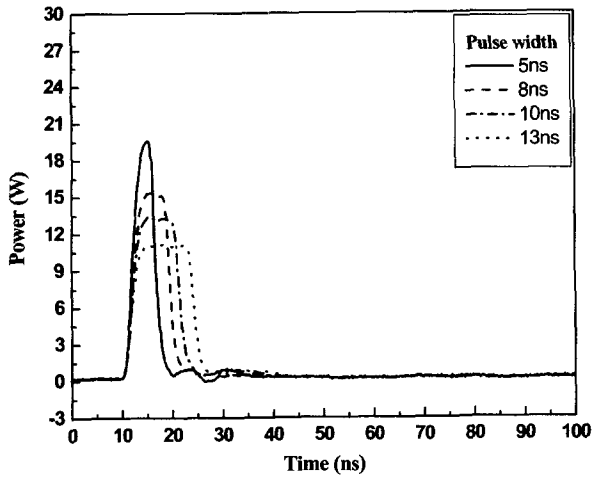
입력 광 세기에 따른 제한된 2단 구조 EDFA의 이득과 잡음 지수를 그림 4에 나타내었다.

대역통과 필터를 사용하지 않은 2단 구조의 경우 소 신호 영역에서 46 dB의 이득과 4.4 dB의 잡음지수를 얻은 반면, 대역통과 필터를 사용한 경우 57 dB로 소 신호 입력에서 이득이 11 dB 증가하였다. 따라서 첫 번째 단과 두 번째 단 사이에 대역통과 필터를 사용한 EDFA는 average power가 소 신호 영역에 해당하는 펄스 신호를 효율적으로 증폭 할 수 있다.

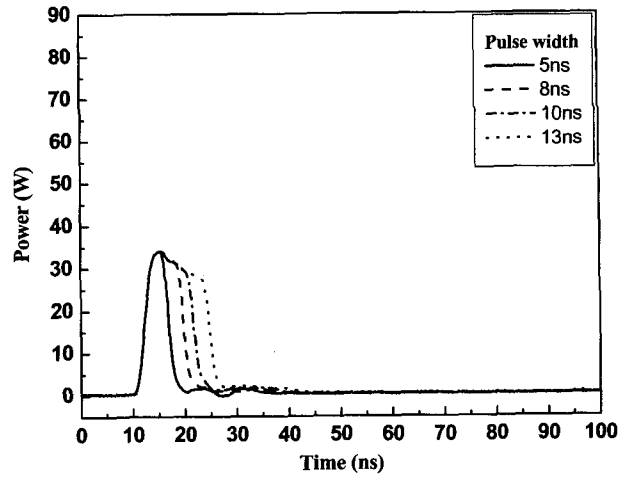
2  $\mu$ s(500 kHz), 10  $\mu$ s(100 kHz), 20  $\mu$ s(50 kHz), 100  $\mu$ s(10 kHz)의 주기에서 29 dB의 extinction ratio와 1 mW의 peak 값을 갖는 펄스 신호를 EDFA의 입력 신호로 사용하였다. 펄스 폭은 5 ns, 8 ns, 10 ns, 13 ns로 변화시켰다.

그림 5는 2  $\mu$ s 주기의 펄스 신호를 증폭하여 oscilloscope로 측정한 출력 스펙트럼이다.

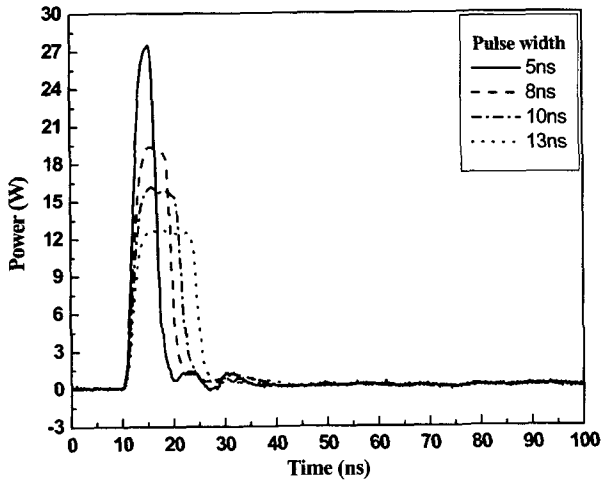
5 ns, 8 ns, 10 ns, 13 ns의 펄스 폭 변화에 따라 대역통과



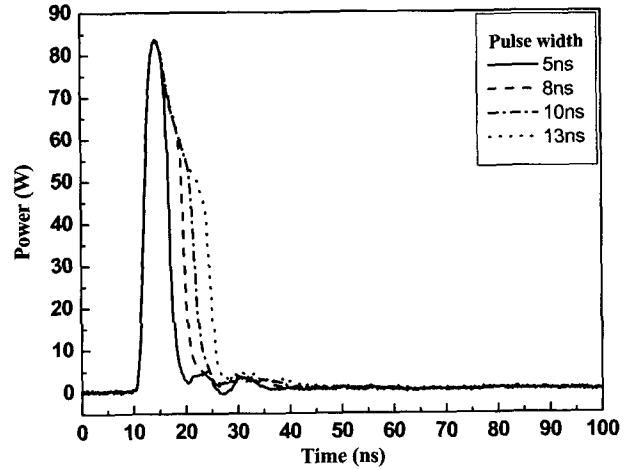
(a) without band pass filter



(a) without band pass filter



(b) with band pass filter



(b) with band pass filter

그림 5. 2  $\mu$ s의 주기에서 펄스 폭에 따른 증폭된 펄스 신호의 세기. (a) 대역통과 필터를 사용하지 않은 경우, (b) 대역통과 필터를 사용한 경우.

그림 6. 100  $\mu$ s의 주기에서 증폭된 펄스 신호의 세기. (a) 대역통과 필터를 사용하지 않은 경우, (b) 대역통과 필터를 사용한 경우.

필터를 사용하지 않은 경우 그림 5(a)와 같이 19 W, 15 W, 13 W, 11 W의 peak 값을 얻었고, 대역통과 필터를 사용한 경우 그림 5(b)와 같이 27 W, 19 W, 16 W, 12 W의 peak 값을 얻었다. 대역통과 필터의 사용으로 펄스의 peak 값이 5 ns의 펄스 폭에서 약 40% 증가하였다. peak 값이 펄스 폭 증가에 따라 줄어드는 것은 입력 신호의 펄스 폭이 증가 함에 따라 펄스 신호의 average power가 증가하기 때문이다. 2  $\mu$ s의 주기, 5 ns 펄스 폭을 갖는 신호의 average power는 약 -25.7 dBm으로 그림 4의 이득 곡선에서 알 수 있듯이 입력 신호에 따른 이득이 감소하는 영역에 해당된다. 따라서 EDFA로 입력 되는 펄스 신호의 power가 펄스 폭이 커짐에 따라 증가하게 되어 EDFA의 이득이 감소하게 되므로 증폭된 펄스의 peak 값이 감소하게 된다.

그림 6은 펄스 주기가 100  $\mu$ s인 경우 펄스 폭에 따라 증폭된 펄스 신호를 나타낸다. 그림 6(a)는 EDFA의 첫 번째 단과 두 번째 단 사이에 대역통과 필터를 사용하지 않았을 때 증폭된 펄스 신호가 34 W의 peak 값을 갖고, 그림 6(b)는

대역통과 필터를 사용했을 때 증폭된 펄스 신호의 peak 값이 83 W로 일정하게 증폭된다. 이것은 EDFA로 입력되는 펄스 신호가 29 dB의 extinction ratio를 갖기 때문이다. 주기가 100  $\mu$ s이고, 5 ns의 펄스 폭을 갖는 신호의 average power는 -43 dBm이고, 13 ns의 펄스 폭을 갖는 신호의 average power는 -39 dBm이다. 29 dB의 extinction ratio를 갖는 입력 펄스 신호의 pulse off power 보다 펄스가 갖는 average power가 매우 낮은 파워를 갖기 때문에 펄스 폭이 5 ns에서 13 ns로 변해도 펄스의 average power 변화는 매우 작은 값이 된다. 따라서 EDFA로 입력 되는 신호의 power가 비슷한 값을 갖게 된다. 따라서 비슷한 값의 입력 신호에 대한 증폭이 되므로 같은 이득을 얻어 같은 peak 값으로 증폭된다. 그리고 peak 모양이 기울어지는 것은 펄스 신호가 높은 peak 값으로 증폭되면서 EDFA의 inversion이 급격히 줄어들기 때문이다.<sup>[4]</sup>

그림 7은 대역통과 필터 사용에 따라 증폭된 펄스 신호의 peak 값을 나타낸다. 주기가 100  $\mu$ s에서 필터를 사용하였을 경

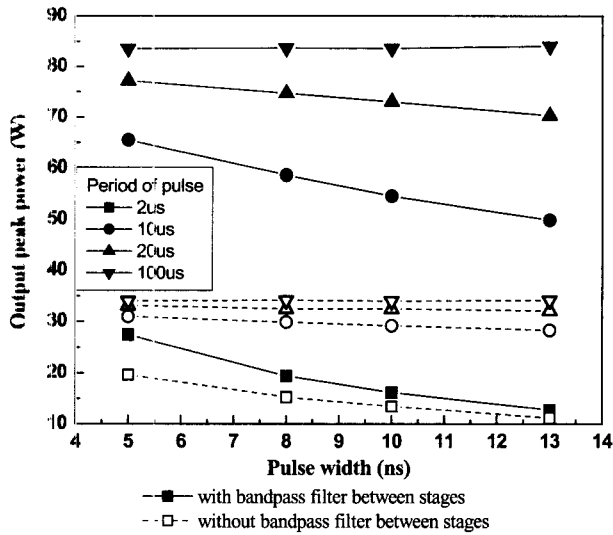


그림 7. 각각의 펄스 주기에서 대역통과 필터 사용에 따른 peak 값의 변화.

우 약 83 W의 일정한 peak 값을 나타내며, 필터를 사용하지 않았을 때 보다 약 50 W 증가하였다. 이것은 대역통과 필터를 사용하여 EDFA의 두 번째 단으로 진행되는 첫 번째 단의 ASE를 제거하였기 때문이다.

주기가 짧은 2 μs(500 kHz)와 10 μs(100 kHz) 역시 대역통과 필터를 사용하여 peak 값이 증가하였다. 이 주기에서의 펄스 신호는 펄스 폭이 커질수록 펄스 신호의 peak 값은 감소한다. 이것은 펄스 폭이 증가 함에 따라 펄스 신호의 average power가 증가하게 된다. 따라서 EDFA 입력 신호의 power가 증가하게 되어 EDFA의 이득이 감소하게 된다.

#### IV. 결 론

본 실험에서는 단일 파장의 펄스 신호 증폭을 위해서 2단 구조의 EDFA를 구성하였다. EDFA의 첫 번째 단과 두 번째 단 사이에 대역통과 필터를 사용하여 소 신호 입력에서 이득이 46 dB에서 57 dB로 11 dB 증가시켰다. 구성된 EDFA를 이용하여 펄스 주기를 2 μs에서 100 μs로 변화시켜가며 펄스 폭에 따른 증폭 특성을 측정하였다. 100 μs 주기를 갖는 1 mW peak 값의 펄스 신호를 증폭하여 83 W peak 값을 갖는 펄스 신호를 얻었다.

#### 감사의 글

본 연구는 정보통신부 “차세대 기간전송망(2002-S-052) 감시기술” 과제의 지원에 의해 연구되었습니다

#### 참고문헌

- [1] 권일범, 최만용, 유재왕, 백세종, “광섬유 BOTDA 센서의 개발” 한국광학회지, 제 12권 4호, pp. 294-298, 2001.
- [2] H. Takara, A. Takada, and M. Saruwatari, “A highly efficient two-stage Er<sup>3+</sup>-doped optical fiber amplifier employing an optical gate to effectively reduce ASE” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 241-243, 1992.
- [3] B. Desthieux, R. I. Laming, and D.N. Payne, “111 kW (0.5 mJ) pulse amplification at 1.5 μm using a gated cascade of three erbium-doped fiber amplifiers” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, No. 5, pp. 586-588, 1993.
- [4] K. Y. Ko, M. S. Demokan, and H. Y. Tam, “Transient analysis of erbium-doped fiber amplifiers” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 1436-1438, 1994.

### Efficient pulse amplification in a two-stage EDFA with a bandpass filter

Byung Jun Kim<sup>†</sup>, Han Hyub Lee, Hyun Beom Choi, and Donghan Lee  
 Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, KOREA  
<sup>†</sup>E-mail: juny@cnu.ac.kr

Dae Yun Kim  
 Agency for Defense Development, Jinhae 645-600, KOREA

Il Bum Kwon  
 Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600, KOREA

(Received August 21, 2002, Revised manuscript March 6, 2003)

Nanosecond pulses are efficiently amplified by a two-stage EDFA. The EDFA employs an optical bandpass filter between stages to remove the amplified spontaneous emission of the first EDFA that strongly saturates the gain of the second EDFA. The peak power of the amplified output pulse is 83 W when that of the input pulse of 10 ns width and 100 μs period is 1 mW.

OCIS Code : 060.232.