《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 14, Number 2, April 2003

EDFA로 증폭된 고출력 펄스 신호의 소광비 향상

김병준† · **최현범** · **이한협** · **이동한**

충남대학교 자연과학대학 물리학과 광전자 실험실

㉾ 305-764 대전 광역시 유성구 궁동 220번지

김대연

국방과학 연구소 1부 9팀

㉾ 645-600 경상남도 진해시 진해우체국 사서함 18호

권일범

한국표준과학연구원 산업측정표준부 비파괴계측그룹

㉾ 305-600 대전 광역시 유성우체국 사서함 102호

(2003년 1월 6일 받음, 2003년 3월 17일 수정본 받음)

높은 peak 값의 광 펄스 신호를 얻기 위하여 대역통과 필터(band pass filter)를 사용한 2단 구조 erbium-doped fiber amplifier (EDFA)를 구성하여 125 W peak 값과 32 dB 소광비(extinction ratio)를 갖는 펄스 신호를 얻었다. 이때 pulse off power는 79 mW이다. pulse off power를 낮추고 소광비를 높이기 위하여 nonlinear optical loop mirror(NOLM)을 사용하였다. NOLM을 통과한 펄스 신호는 35 W peak 값과 0.3 mW pulse off power, 50.4dB 소광비를 갖는다.

주제어 : extinction ratio, NOLM, EDFA, pulse amplification.

I. 서 론

최근 WDM 방식을 이용한 광통신은 고용량, 장거리화 되어 가고 있으며, 이와 더불어 전송의 신뢰도를 높이기 위한 광 전송로의 감시 또한 필요성이 더욱 커지고 있다. 전송로의 감시를 위하여 전송 라인에 optical time domain reflectometry (OTDR)를 사용하여 광 전송로를 감시하는 기술이 연구되고 있다.[1] 그리고 Brillouin optical time domain analysis(BOTDA)는 통신용 광섬유를 사용하여 구조물의 넓은 면적에 대한 변형률과 넓은 지역을 감시하는 침입 감시용 센서로 활용 되고 있다.[2,3] OTDR은 광섬유에 입력되는 펄스 신호에 의해 산란되어 되돌아 오는 신호를 분석하여 손실 위치와 절단 위치를 찾아내고, BOTDA는 광섬유에 펌핑 펄스 광원과 CW probe 광원을 각각 광섬유의 양단에서 입사시켜 두 광원 사이에서 발생하는 유도 Brillouin 증폭을 이용하는 유도 Brillouin 산란 분광을 이용하여 구조물의 변형률을 측정한다.[4] OTDR, BOTDA등과 같이 펄스 신호를 사용하여 넓은 지역이나 장거리를 감시하기 위해서는 긴 길이의 광섬유 자체 손실이 크기 때문에 높은 출력의 광 펄스 신호를 필요로 한다.

저는 논문은 센서용으로 사용되도록 간단한 구조의 EDFA를 구성하여 높은 peak 값을 갖는 펄스 신호를 얻었다.[5,6] 그러나 EDFA로 증폭된 펄스 신호는 높은 peak 값을 갖지만 펄스가 없는 부분의 파워(pulse off power) 역시 함께 증폭된다. 증폭된 펄스 신호를 광섬유에 입력할 경우 pulse off power에 의해 광섬유 센서의 감도를 저하시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 saturable absorber로 응용되는 nonlinear optical loop mirror (NOLM)을 사용하여 pulse off power를 줄이고 소광비를 향상시키고자 하였다.[7,8]

†E-mail: bjuny75@hotmail.com

II. 실험 구성

광 펄스 신호의 증폭과 소광비를 향상시키기 위하여 그림 1과 같이 실험장치를 구성하였다.

1553 nm 파장의 distributed feedback laser diode(DFB LD)를 광원으로 하여 $LiNbO_3$ 변조기(modulator)를 사용하여 펄스 신호를 만들었다. $LiNbO_3$ 변조기의 편광 특성으로 인하여 변조기 앞에 편광 조절기(polarization controller: PC)를 사용하여 펄스 신호의 소광비가 최대가 되도록 하였다. 변조된 펄스 신호는 EDFA를 통해 증폭된 후 NOLM을 통과하면서 소광비가 향상된다. 펄스 신호는 photo diode(PD)로 검출하여 oscilloscope로 확인 하였다. 증폭된 펄스 신호는 높은 peak 값을 갖기 때문에 PD의 saturation을 막기위해 광 감쇠기(attenuator)를 사용하였다.

사용된 EDFA는 2단 구조로 1단은 EDF-4.5m(Er^{3+} 800ppm)를 980nm pump 120 mW로 순방향 pumping 하고, 2단은 EDF-11m(Er^{3+} 800 ppm)를 980 nm pump 280 mW, 1480 nm pump 160 mW로 양방향 pumping 하였다. 1단과 2단 EDFA 사이에 대역통과 필터를 사용하여 1단 EDFA에서 발생한

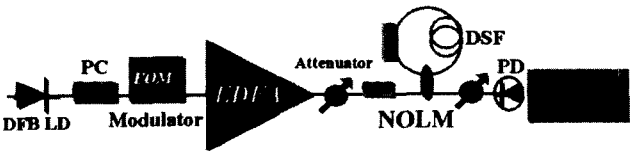

그림 1. 펄스 증폭과 증폭된 펄스 신호의 소광비 향상을 위한 실험 구성도. DFB LD: distributed feedback laser diode, EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier, EOM: Electro optic Modulator, PD: photo diode, PC: polarization controller, NOLM: nonlinear optical loop mirror, DSF: dispersion shift fiber.

ASE 신호가 2단 EDFA로 입력되는 것을 제거하였다. 대역통과 필터의 사용으로 1단 EDFA의 ASE 신호에 의해 2단 EDFA의 이득을 강하게 포화 시키는 것을 줄일 수 있게 되므로 EDFA의 소 신호 영역 이득이 증가하게 된다. 필터를 사용한 2단 구조 EDFA는 소 신호 영역에서 58 dB 이득을 갖는다. 필터를 사용하지 않았을 때 보다 11 dB 증가 하였다.

대역 통과 필터를 사용한 2단 구조 EDFA를 사용하여 증폭된 펄스 신호의 소광비를 향상 시키기 위하여 NOLM을 사용하였다. NOLM은 2×2 coupler를 사용하여 한쪽은 입력과 출력으로 사용하고 다른 쪽의 두 광섬유를 서로 연결하여 loop을 만든 구조로 Sagnac 간섭계를 광섬유에 응용한 것이다.[7,8] NOLM은 광통신, 광신호 처리를 위한 빠른 광스위칭 소자, 수동형 모드고정 광섬유 레이저를 위한 빠른 포화 흡수체, 그리고 펄스 압축용으로 활용되고 있다.[9-11]

NOLM의 loop은 dispersion shift fiber(DSF)를 사용하였고, 입력쪽과 loop내에 편광 조절기를 사용하여 편광을 조절하였다. NOLM으로 입력된 신호는 coupler에 의해 두 방향으로 나누어져 loop를 돌게 된다. 이때 서로 다른 광 세기를 갖도록 coupler 비율을 조절하면 서로 반대 방향으로 같은 경로를 진행하는 광은 광섬유의 비선형 굴절률로 인하여 서로 다른 위상 변화를 갖게 된다. 서로 반대 방향으로 진행한 광은 coupler에서 다시 만나게 되어 비선형 투과율을 갖게 된다. 즉 작은 입력 신호에서는 입력 쪽으로 반사하고, 입력 신호의 파워가 증가하면 출력 단으로 투과하는 광신호의 파워가 증가한다.

식 (1)은 NOLM의 투과율(T_m)이다. coupling ratio(α)와 loop의 길이(L)가 고정되어 있다면 투과율은 입력 신호의 세기(P^{in})와 nonlinear index(n_2)에 의해서 결정된다. 즉, 큰 파워 값을 갖는 광신호는 높은 투과율을 갖고, 이보다 낮은 파워를 갖는 광신호는 입력 단으로 반사된다. 만일 coupling ratio가 0.5가 되면 식 (1)에 의해 NOLM으로 입력되는 모든 광 신호는 입력쪽으로 반사하게 된다.

$$T_m = 1-2\alpha(1-\alpha)[1+\cos(\Delta\phi)]$$
$$\Delta\phi = (1-2\alpha)\frac{2\pi}{\lambda A_{eff}} n_2 P^{in} L \qquad (1)$$

그림 2는 NOLM으로 입력되는 신호의 power에 따른 투과율의 변화를 나타내는 계산 결과이다. 파장(λ) 1553 nm에서 비선형 굴절률은 3.2×10^{-20} m^2/W이고, 광섬유 core의 유효면적(A_{eff})은 30×10^{-12} m^{2}일 때 NOLM loop 길이에 따른 투과율

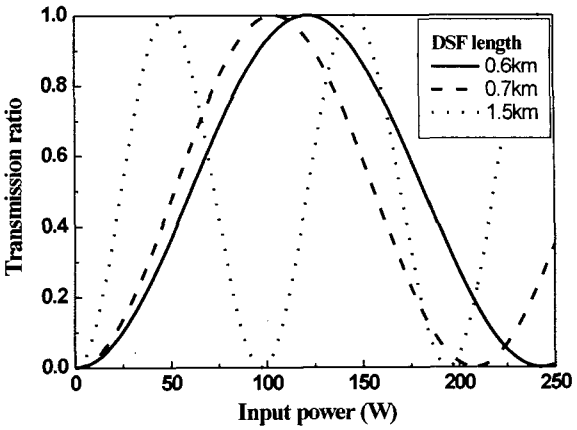

그림 2. 입력 파워에 따른 NOLM 투과율.

의 변화를 나타낸다. loop 길이가 짧아질수록 투과율이 1이 되는 입력 power가 커지고, 10 W 이하의 작은 입력 신호에서는 낮은 투과율을 갖는다. 낮은 입력 power를 갖는 입력신호 대부분이 입력 단으로 반사하게 된다.

III. 실험 결과

50 μs(20 kHz)의 주기에서 소광비 33 dB, 펄스 폭 10 ns, 0.9 mW의 peak 값을 갖는 펄스 신호를 EDFA의 입력 신호로 사용하였다.

그림 3은 대역통과 필터를 사용한 2단 구조 EDFA로 증폭된 펄스 신호이다. 이때 peak 값은 123 W로 51 dB 이득을 얻었고, 32 dB 소광비를 갖는다. 펄스가 없는 부분의 파워(pulse off power) 역시 같은 이득을 얻어 79 mW까지 증폭되었다. 증폭된 펄스 신호를 센서에 응용할 경우 pulse off power가 원하지 않는 SBS를 발생시켜 센서의 감도를 저하 시킬 수 있으므로 pulse off power를 줄여야 한다. pulse off power를 줄이기 위해서 NOLM을 사용하였다.

그림 4는 NOLM 입력 펄스 신호의 peak 값에 따라 출력되는 펄스 신호의 peak 값 변화를 나타낸다. NOLM의 loop

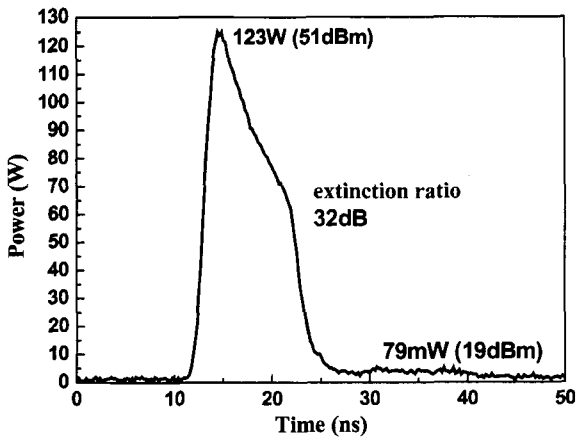

그림 3. 주기 50 μs 일 때 증폭된 펄스 신호.

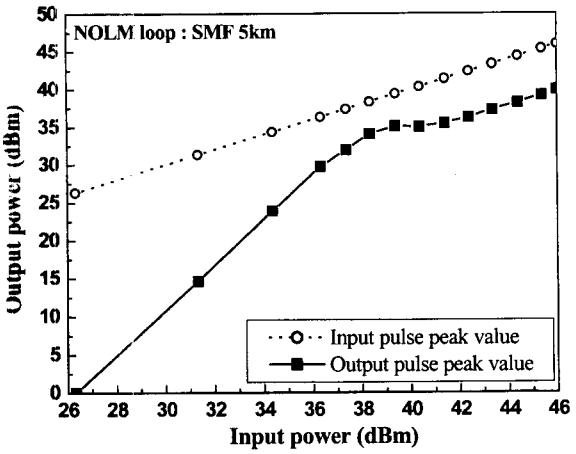

그림 4. 입력 펄스의 peak 값에 따른 NOLM 출력 단의 peak 값.

길이는 단일 모드 광섬유(single mode fiber: SMF)와 DSF를 사용하였다. 사용된 펄스 신호는 주기 50 μs, 펄스 폭 5 ns를 갖는다. NOLM으로 입력되는 펄스 신호의 peak 값이 36 dBm (4 W) 보다 작은 값에서는 NOLM의 손실이 증가한다. 즉 4 W 보다 작은 입력 신호에 대해서 입력 쪽으로 반사되는 파워가 커지고, 출력 쪽의 파워는 입력 파워보다 작아진다. 4 W 보다 큰 입력 펄스에서는 일정한 손실 값을 갖는다.

그림 4는 펄스 신호의 소광비를 향상시키기 위한 좋은 결과를 보여준다. 펄스 신호의 높은 peak 값은 6 dB 손실을 갖지만 낮은 입력 파워인 pulse off power는 20 dB 이상의 손실을 갖게 되어 NOLM을 사용할 경우 펄스 신호의 소광비가 향상된다.

NOLM의 loop을 DSF 1.5 km로 구성하였을 때 결과를 그림 5에 나타내었다. peak 값이 36 W, 소광비 32 dB의 펄스 신호를 NOLM에 입력하여 46.4 dB 소광비를 갖는 펄스 신호를 얻었다. NOLM 입력 펄스의 peak 값이 더 높아지면 DSF 내의 비선형 현상이 강하게 일어나 펄스 모양이 왜곡되고, 펄스 폭이 넓어진다. 펄스 모양을 유지 하면서 소광비를 향상시키기 위하여 NOLM의 입력 펄스의 peak 값을 낮게 하였다. NOLM 사용으로 인하여 pulse off power가 약 20 dB 낮아졌다.

소광비를 높이고 peak 값을 높이기 위하여 loop을 구성한 DSF 길이를 줄여가며 측정하였다. NOLM을 통과해 나오는 펄스가 왜곡 되지 않도록 유지하면서 DSF의 길이에 따라 NOLM으로 입력되는 펄스의 peak 값을 조절하였다. DSF의 길이가 짧아질수록 NOLM으로 입력되는 peak 값을 증가 시킬 수 있었다. 그리고 NOLM 출력 단의 펄스 peak 값은 증가 하였고, pulse off power는 0.3 mW 이하로 유지 되었다.

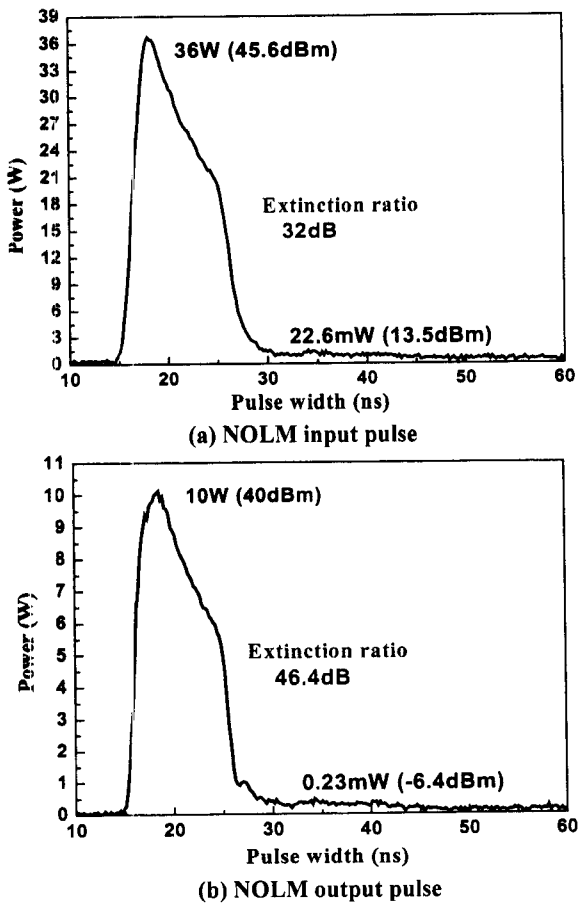

그림 5. NOLM loop 길이가 1.5 km일 때 증폭된 펄스 신호의 소광비 향상.

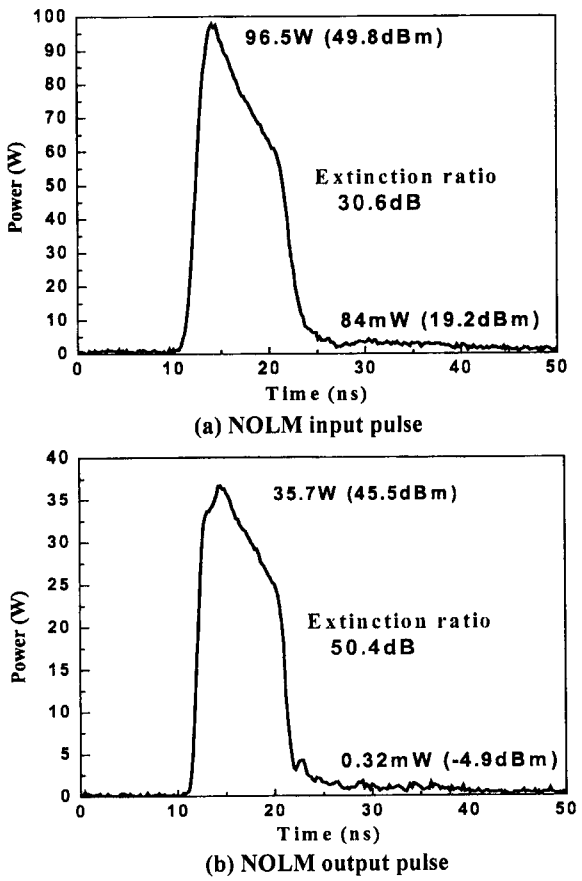

그림 6. NOLM loop 길이가 230 m일 때 증폭된 펄스 신호의 소광비 향상.

Loop 내의 DSF의 길이가 230 m일 때의 결과를 그림 6에 나타내었다. NOLM 입력 펄스의 peak 값은 96 W일 때, 출력되는 펄스의 peak 값은 35 W로 높아 졌으며, 이때의 소광비는 50.4 dB였다. 이때 pulse off power는 24 dB 낮아진 0.3 mW였다.

IV. 결 론

광섬유를 이용한 BOTDA 센서에서 pumping 광원, OTDR의 펄스 광원으로 사용되는 높은 출력의 펄스 신호를 얻기 위하여 2단 구조 EDFA를 사용하였다. 주기 50 μs, 펄스 폭 10 ns, 소광비 33 dB의 펄스 신호를 증폭하여 125 W의 peak 값을 갖는 펄스 신호를 얻었다. 증폭된 펄스 신호는 32 dB 소광비를 갖는다.

증폭된 펄스 신호를 센서에 사용할 경우 수십 mW의 pulse off power가 광섬유 내에서 원하지 않는 Brillouin 이득을 주어 센서의 감도를 저하 시킬 수 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 작은 입력 파워는 입력 단으로 반사 시키고, 높은 입력 파워는 투과 시키는 특성을 갖는 NOLM을 사용하여 pulse off power를 0.3 mW 이하로 낮추었다. 이때의 peak 값은 35.7 W이며 50.4 dB 소광비를 갖는 펄스 신호를 얻었다. 이렇게 소광비를 향상시킨 펄스 신호의 average power은 6.4 mW이다.

이 실험을 통해 얻어진 펄스 신호는 BOTDA 센서에서 효율적인 pumping 광원으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 OTDR에 사용할 경우 높은 peak power는 보다 긴 길이의 광섬유 라인을 감시 할 수 있으며, 10 ns의 짧은 펄스 폭은 높은 resolution을 얻을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 "초고속 정보통신 인프라망 효율적 관리를 위한 핵심기술 개발 (2002-S-052)" 과제의 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

[1] Y. Sato and K.I. Aoyama, "Optical time domain reflectometry in optical transmission lines containing in-line Er-doped fiber amplifiers" Lightwave Technol., vol. 10, no. 1, pp. 78 -83, 1992.

[2] 권일범, 최만용, 유재왕, 백세종, "광섬유 BOTDA 센서의 개발" 한국광학회지, 제 12권 4호, pp. 294-298, 2001.

[3] T. Horiguchi, T. Kurashima, and M. Tateda, "A technique to measure distributed strain in optical fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 2, pp. 353-354, 1990.

[4] M. Nikles, L. Thevenaz, and P. A. Robert, "Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers," *Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 10, pp. 1842-1851, 1997.

[5] H. Takara, A. Takada, and M. Saruwatari, "A highly efficient two-stage Er^{3+}-doped optical fiber amplifier employing an optical gate to effectively reduce ASE" *IEEE Photon. Technal. Lett.*, vol. 4, pp. 241-243, 1992.

[6] 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.

[7] N. J. Doran and D. Wood, "Nonlinear-optical loop mirror," *Opt. Lett.*, vol. 13, pp. 56-58, 1988.

[8] I. N. Duling, III, C.-J. Chen, P. K. A. Wai, and C. R. Menyuk, "Operation of a nonlinear loop mirror in a laser cavity," *IEEE. J. Quantum Electron.* vol. 30, no. 1, pp. 194-199, 1994.

[9] W. Y. Oh, B. Y. Kim, and H. W. Lee, "Passive mode locking of a Neodymium-doped fiber laser with a nonlinear optical loop mirror," *IEEE. J. Quantum Electron.* vol. 32, no. 2, pp. 333-339, 1996.

[10] K. Smith, N. J. Dora, and P. G. J. Wigley, "Pulse shaping, compression, and pedestal suppression employing a nonlinear-optical loop mirror," *Opt. Lett.* vol. 15, pp. 1294-1296, 1990.

[11] E. Yamada and M. Nakazawa, "Reduction of amplified spontaneous emission from a transmitted soliton signal using a nonlinear amplifying loop mirror and a nonlinear optical loop mirror," *IEEE. J. Quantum Electron.* vol. 30, no. 8, pp. 1842-1850, 1994.

Improvement of extinction ratio of amplified pulses by incorporating a nonlinear optical loop mirror

Byung Jun Kim†, Hyun Beom Choi, Han Hyub Lee, and Donghan Lee
Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, KOREA
†*E-mail: bjuny75@hotmail.com*

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 January 6, 2003, Revised manuscript March 17, 2003)

A two-stage erbium-doped fiber amplifier (EDFA) with a band pass filter is used to get optical pulses of high peak value. The pulse signal has a 32 dB extinction ratio, 125 W peak power and 79 mW pulse off power. A nonlinear optical loop mirror (NOLM) is used to lower the pulse off power so as to increase the extinction ratio. The pulse signal after the NOLM has a 50.4 dB extinction ratio, 35 W peak power and 0.3 mW pulse off power.

OCIS Codes : 060.2310, 060.2320.