

반도체 광증폭기 루프 거울을 포함한 8자형 레이저를 이용한 10Gb/s RZ 신호의 전광 클럭 추출

정희상[†] · 주무정 · 김광준 · 이종현

한국전자통신연구원 교환전송기술연구소 광통신연구부

Ⓣ 305-350 대전시 유성구 가정동 161번지

(2000년 7월 28일 받음, 2000년 11월 28일 수정본 받음)

능동 모드 잠김 8자형 레이저를 이용하여 10 Gb/s RZ 신호로부터 클럭을 추출하고 이 클럭 성분의 품질을 평가하였다. 10 ps의 펄스폭을 갖는 광원을 $2^{23}-1$ PRBS로 외부 변조하였으며 이를 클럭 추출 회로에 인가함으로써 12 ps의 펄스폭을 갖는 클럭을 얻었다. 이렇게 얻어진 펄스를 다시 같은 외부 변조기에 입력하여 BER을 측정한 결과 10^{-11} 의 BER에서 페널티가 거의 나타나지 않았다.

OCIS codes : 060.2330, 060.5530, 140.3520.

I. 서 론

인터넷을 통한 멀티미디어 서비스가 보편화 되면서 통신 용량은 전세계적으로 급증하고 있으며, 이에 따라 가까운 장래에 테라 비트급의 전광(all-optical) 네트워크 백본망이 필요할 것으로 생각된다. 이를 구현할 방법으로는 파장 분할 다중화 방식의 초고속 광전송 및 네트워크 기술이 고려되고 있으며, 여기에는 전광 클럭 추출(Clock Recovery: CR)이나 전광 파장 변환과 같은 전광 신호 처리 기술이 요구된다. 전광 CR은 광신호로부터 클럭을 복구하는 것으로 기존의 electronic PLL(Phase-Locked Loop) 방식과는 달리 고속의 전기소자를 이용하지 않고 광 대 광으로 복구하는 방법이다. 전광 CR을 이용하면 전광 재생이 가능하므로 단순히 광증폭기만을 이용하는 경우에 비해 전송 거리를 대폭 확장할 수 있다.^[1,2]

전광 CR을 구현하는 방법으로는 injection locking^[3-5]을 통한 모드 잠김 레이저를 이용하는 방법과 optical PLL^[6,7] 방법 등이 있다. Injection locking 방법 중에서 반도체를 이용한 self-pulsating DFB LD^[3]는 크기가 작고 SOA(Semiconductor Optical Amplifier) gate와 집적이 가능한 장점이 있으며, NOLM(Non-Linear Optical Loop Mirror)을 포함한 광섬유 레이저^[4,5]는 상용화된 부품을 이용하여 구성이 가능해 신뢰도가 높은 방법이다. Optical PLL 방법은 현재 상용화되어 널리 쓰이는 electronic PLL의 고속 전기 회로를 펄스 레이저로 대체하여 100 Gb/s급의 초고속 CR을 구현할 수 있는 방법이다. 본 논문에서는 능동형 모드 잠김을 이용한 8자형 레이저(Fig. 8 Laser: F8L)를 이용하여 전광 클럭 추출을 하였으며 이를 이용한 신호 재생을 통하여 신호의 품질을 평가하였다.

II. 본 론

클럭 추출을 위해 사용된 8자형 레이저의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 전체 루프는 주 증폭 부분과 NOLM 부분으로 나눌 수 있으며 각각 중앙의 3 dB 커플러의 좌우에 위치한다. 주 증폭 부분은 이득 매질인 에르븀 첨가 광섬유(Erbium-Doped Fiber: EDF)와 이를 여기 시키기 위한 980 nm LD를 포함한다. TD(Tunable Delay Line)는 200 ps의 범위에서 time delay를 조절할 수 있으며, 회로에 입력 되는 신호의 비트율(bit rate)에 따른 resonance 조건을 만족하는 레이저 공진기의 길이를 맞추는데 사용되었다. BPF(Band Pass Filter)는 1530 nm~1560 nm 범위에서 발진 주파수를 선택 할 수 있도록 하며, 펄스 레이저의 출력을 위하여 10% 탭을 이용하였다.

NOLM은 SOA를 이용한 SLALOM(Semiconductor Laser Amplifier in a Loop Mirror)으로서 중앙의 3 dB 커플러에서 볼 때 대칭되는 위치에서 200 ps 범위에서 움직일 수 있도록 SOA를 배치하였으며, 이때 주 증폭부에 쓰인 것과 같은 TD를 이용하였다. SOA는 Alcatel사의 제품으로 200 mA의 구동 전류에서 9 dBm의 포화 출력을 낼 수 있다. 비록 SOA의 switching time이 1 ns 밖에 안되지만, SLALOM의 transmission window는 시계 방향으로 진행되는 펄스와 반시계 방향으로 진행되는 펄스가 SOA에 도달하는 시간의 차이에 의해서 결정이 되며,^[8] 이를 이용하여 40 GHz의 고속에서 클럭 추출이 보고되었다.^[9] 시계 방향으로 진행되는 빛과 반시계 방향으로 진행되는 빛은 3 dB 커플러에서 같은 편광 상태로 입사하지만 SLALOM의 복굴절에 의해서 편광 offset을 가질 수 있다.

SLALOM의 transmission window를 측정하기 위해서 1555 nm의 CW 레이저를 입력하였다. CW 레이저는 3 dB 커플러에서 분기될 때는 같은 위상을 갖고 있으나 외부에서 10 Gb/s의 RZ 데이터('모두 1')로 SOA를 포화 시켜주면 위상이 변화한다. 서로 반대 방향으로 진행되는 광이 SOA에 도달하는 시간에 차이가 있으므로 3 dB 커플러에서 다시 결합될 때는

[†]E-mail: hschung@etri.re.kr

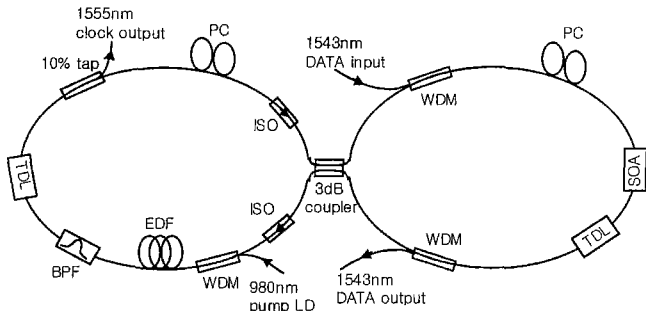


그림 1. SLALOM을 포함한 능동 모드 잠긴 8자형 레이저의 구성도. PC: polarization controller, ISO: isolator, WDM: wavelength-division multiplexer, EDF: Erbium-doped fiber, BPF: band pass filter, TDL: tunable delay line, SOA: semiconductor optical amplifier.

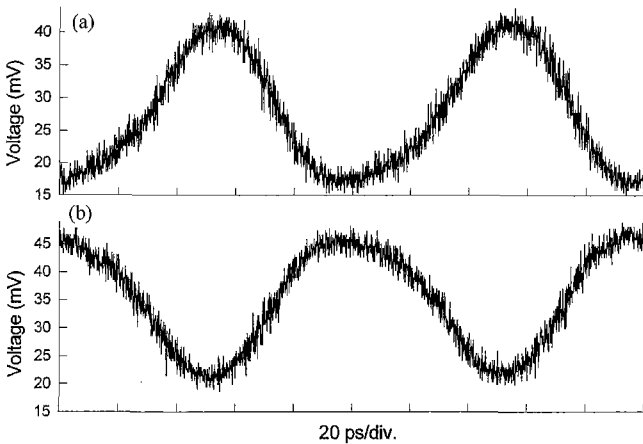


그림 2. SLALOM의 transmission window. 1555 nm의 CW 레이저를 입력하고 10 Gb/s 펄스 광원으로 SOA를 주기적으로 포화시켰으며, (a)와 (b)는 PC offset이 서로 π 차이가 난다. SOA의 center로부터의 offset은 30 psec이다.

이 시간 간격 동안은 투과가 커지게 된다. 외부에서 주입한 데이터는 1543 nm의 파장을 갖고 있으며 1543/1555 nm WDM 커플러에 의해 입력력이 이루어지므로 SLALOM의 출력은 1555 nm의 신호만이 존재한다. 그림 2는 PC(Polarization Controller)를 이용하여 SLALOM의 편광 offset을 변화시킬 때의 transmission window를 20 GHz pin detector를 이용하여 측정한 것이다. 2(a)는 PC에 의한 offset이 거의 없어서 외부 데이터에 의한 SOA에서의 위상 변화가 투과 상태를 만드는 경우이고 2(b)는 반대로 소멸 간섭을 유발하는 경우이다. PC에 의한 편광 offset과 SOA에서의 편광 offset을 포함하면 서로 π 의 위상 차이가 있음을 알 수 있다. 이때 SOA의 위치는 대칭점에서 30 ps이며, pin detector의 rise time이 충분히 빠르지 않아 정확한 transmission window의 FWHM 측정은 되지 않았으나 각 경우에 30 ps와 70 ps에 근접하는 값을 보이고 있다. 각 경우에 8자형 레이저의 출력을 그림 3에 나타내었다. SLALOM의 transmission window가 30 ps에 가까운 경우에는 jitter나 잡음이 적은 반면, 70 ps에 가까운 경우에는 jitter나 잡음이 많이 나타나고 있다.

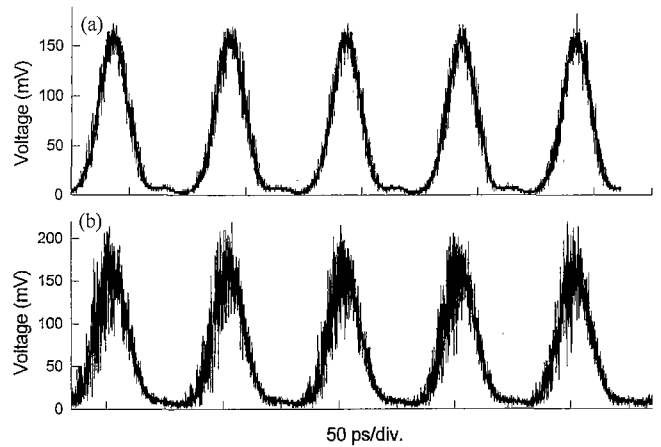


그림 3. 10 Gb/s의 광원(all '1')으로 SOA를 주기적으로 포화 시켜서 얻은 8자 레이저의 출력. (a)와 (b)는 각각 그림 2(a)와 (b)의 조건에서 측정한 것으로 투과 스펙트럼의 FWHM은 각각 (a) 30 ps, (b) 70 ps이다.

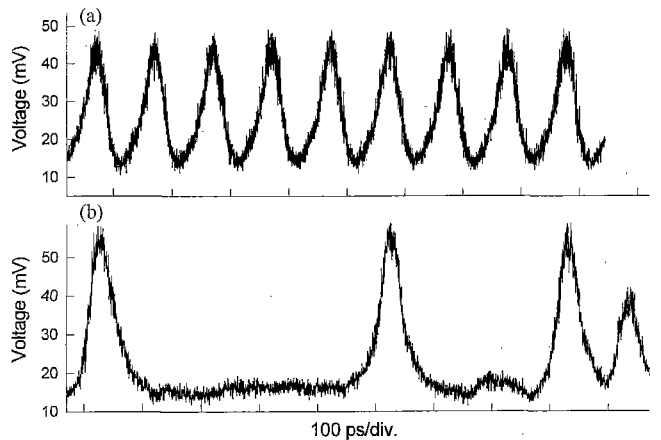


그림 4. SLALOM의 transmission window. (a)는 입력 데이터가 모두 '1'일 때이며 (b)는 '1000010011'일 경우이다.

입력 데이터의 패턴에 따라서 SLALOM의 투과도 바뀌기 때문에 임의의 패턴을 갖는 데이터가 입력될 때는 펄스 레이저의 출력이 불안정 하거나 jitter가 커지게 된다. 그림 4는 입력 데이터 패턴이 '모두 1'인 경우와 '1000010011'인 경우의 transmission window를 나타낸다. 그림 4(a)에서는 입력 패턴과 같은 극성을 갖는 균일한 출력을 나타내는 반면 그림 4(b)의 경우에는 입력 패턴과 같은 극성을 보이면서도 출력이 균일하지 않다. 즉, '0' 다음에 '1'이 나올 때는 '1'이 연속해서 나오는 경우 보다 출력이 크게 나타난다. 이러한 이유로는 transmission window의 형성에는 위상 변조 뿐만 아니라 SOA에서의 이득 변조도 포함되기 때문이다. 즉, '0' 다음에 '1'이 나오는 경우와 다르게 연속해서 '1'이 입력되면 SOA의 이득이 포화 되어 바로 회복되지 않기 때문에 출력이 감소한다. 그러나 이 경우에 투과가 다소 감소하더라도 '0'이 입력되는 경우 보다는 투과가 크다. 입력 데이터가 '0'인 경우 SLALOM에서는 XPM(Cross Phase Modulation)에 의한 편광 offset이 없으므로 편광 offset에 따라서 투과가 없거나 있는

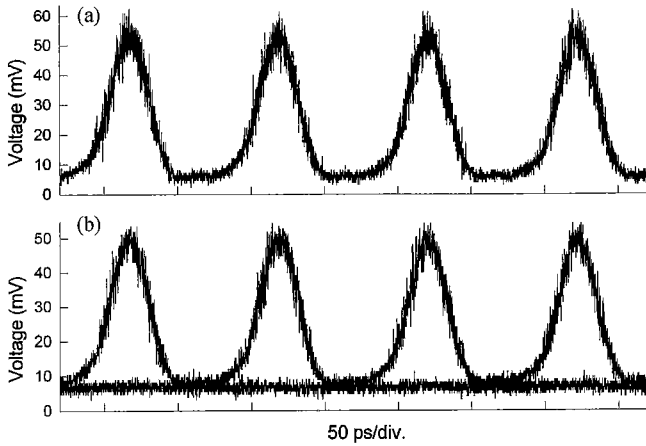


그림 5. Injection되는 신호 패턴이 '모두 0'일 때의 (a) SLALOM에 입력된 펄스 열, (b) 출력. PC offset에 따라서 출력은 '모두 0'이 되거나 입력 펄스 열과 같은 패턴을 나타낸다.

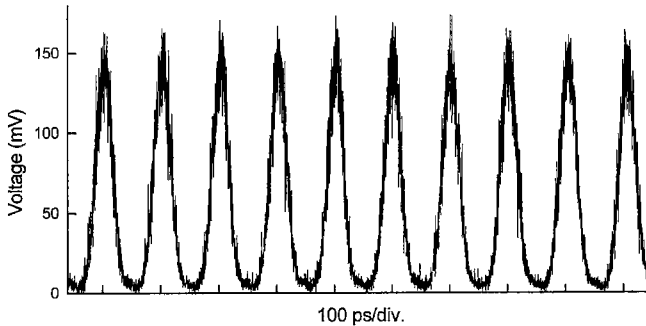


그림 6. $2^{23}-1$ PRBS 데이터를 입력할 때의 추출된 클럭의 펄스 열.

상태로 유지될 것이다. 그럼에도 불구하고 광섬유 레이저 루프에서 SLALOM에 입력되는 펄스의 세기가 커질 경우에 의한 SPM(Self Phase Modulation)에 의한 위상 변화로 인해서 투과가 커질 수 있다.^[10] 그림 5는 SLALOM의 WDM에 외부 펄스를 입력하지 않고 3 dB 커플러의 입력 포트에 펄스 열을 입력하면서 출력을 측정하는 것이다. 5(a)는 입력 펄스 열을 나타내며 (b)는 PC offset의 변화에 따른 출력을 측정하는 것으로 편광 상태에 따라서 같은 주기를 갖는 transmission window가 형성되거나 아니면 모두 '0'이 될 수도 있다. 즉, 분기되어 미주 보며 진행되는 광파가 겪는 SPM에 의한 위상 변화와 PC offset에 의한 위상 변화가 더해져서 π 의 위상 변화가 나타나면 입력 패턴이 출력되고, 위상 변화가 없거나 2π 이면 출력이 거의 나오지 않는다. 이때 SOA에는 60 mA의 전류를 인가하였고 입력 펄스 에너지는 40 fJ이다. 따라서 본 실험에서 제작되어 이용된 SLALOM은 매우 낮은 펄스 에너지에서도 펄스 패턴과 같은 투과를 갖기 때문에 '0'이 연속 입력되는 경우에도 안정된 펄스 출력을 가질 수 있다. 그림 6은 $2^{23}-1$ PRBS(Pseudo Random Bit Sequence)의 데이터를 입력하면서 측정된 8자형 레이저의 출력을 나타내고 있으며, 최대 23개의 연속하는 '0'이 나올 수 있음에도 불구하고 펄스 열은 안정되게 나타났다. 펄스의 폭을 측정하기 위

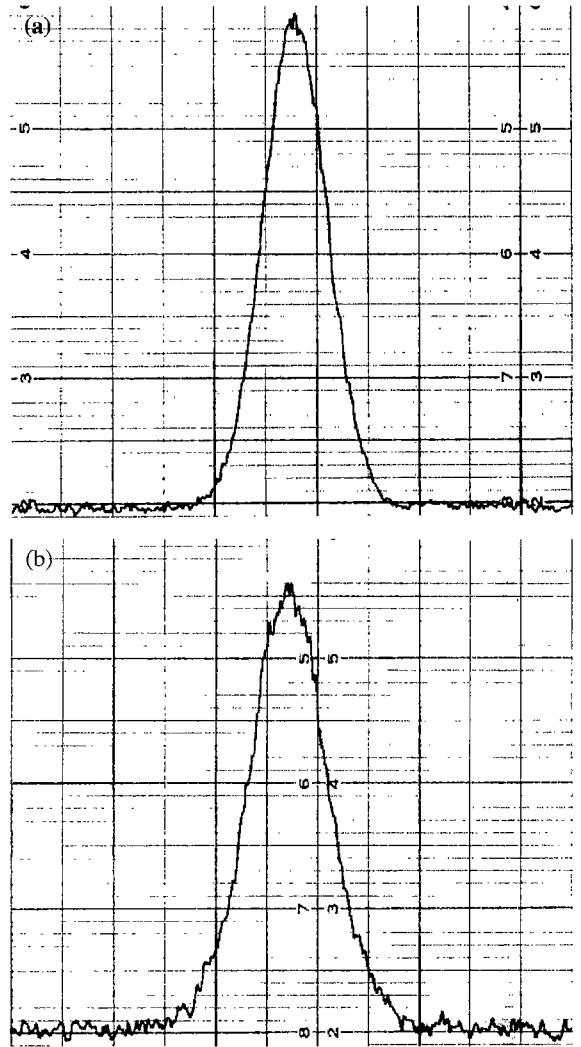


그림 7. (a) 10 ps의 펄스폭을 보여주는 광원의 autocorrelation pulse trace. 수평축의 scale은 5 ps/div.이다. (b) 12 ps의 펄스폭을 보여주는 클럭의 autocorrelation pulse trace. 수평축의 scale은 5 ps/div.이다.

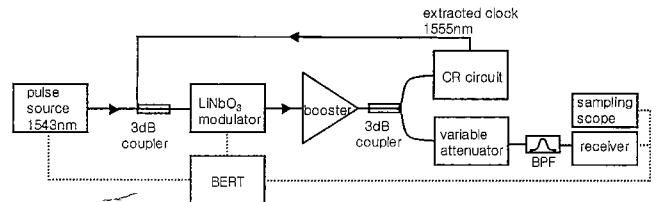


그림 8. 클럭 추출과 이의 평가를 위한 실험 장치도. CR: clock recovery, Bert: bit error rate tester

하여 autocorrelator를 이용하였으며, 그림 7은 신호 광원과 추출된 클럭 신호의 autocorrelation pulse trace이다. Gaussian 펄스 모양을 가정하면 신호 광원의 펄스폭은 10 ps이며, 클럭 신호의 펄스폭은 12 ps이다.

추출된 클럭의 품질을 평가하기 위하여 신호 광원과 추출된 클럭 신호를 이용하여 BER(Bit Error Rate)을 측정하였다.^[11] 그림 8은 실험 장치도이며 실선은 광학적인 신호의 흐름을 나

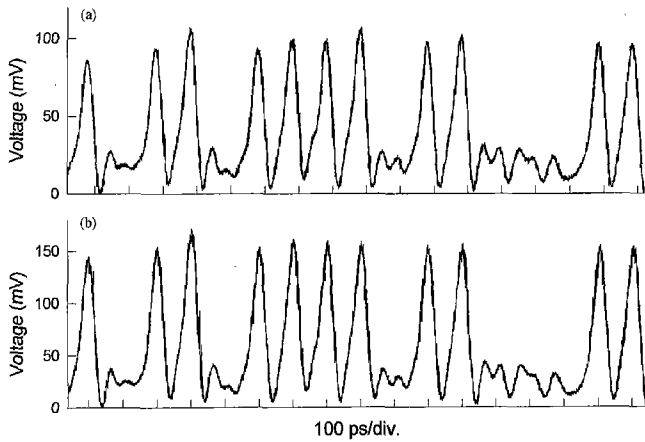


그림 9. (a) 2^7-1 PRBS로 변조된 1543 nm 광원의 데이터 패턴. (b) 2^7-1 PRBS로 변조된 1555 nm 클럭의 데이터 패턴.

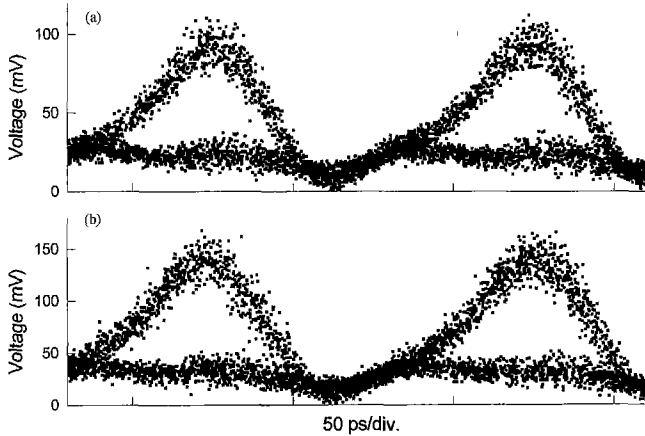


그림 10. $2^{23}-1$ PRBS 패턴에서 측정된 (a) 원래 광원과 (b) 재생된 신호의 eye diagram.

타내며 점선은 전기적인 신호의 접속을 보여준다. 본 실험에 사용한 광원(Pritel, Inc.)의 반복율은 최대 20 GHz이며 외부에서 인기하는 전기적인 동기 신호에 따라서 반복율이 가변되고, 파장은 1540 nm~1560 nm 범위에서 바꿀 수 있다. 이 광원은 10 Gb/s의 펄스 패턴 발생기(Pulse Pattern Generator: PPG)와 연결된 LiNbO₃ 외부 변조기에 의해서 변조되고 광전력증폭기(Booster)에 의해서 증폭된 다음 일부는 CR 회로에 입력되고 일부는 가변 감쇄기와 BPF를 거쳐서 수신기 혹은 sampling scope로 입력된다. CR 회로에서 추출된 1555 nm의 클럭은 3 dB 커플러를 통하여 원래의 광원과 함께 다시 외부 변조기로 입력된다. 따라서 booster의 출력은 원래의 광원의 변조된 신호와 추출된 클럭의 변조된 신호가 함께 있으므로 수신 단에서는 BPF로 둘 중에 한 파장을 선택하여 수신한다. 그림 9(a)는 2^7-1 PRBS로 변조된 신호 광원의 패턴을 나타내며, 9(b)는 추출된 클럭 데이터의 패턴을 보여주고 있으며 온전하게 재생된 것을 알 수 있다. 그림 10(a)와 (b)는 각각 $2^{23}-1$ PRBS에서 펄스 광원과 추출된 클럭 데이터의 eye diagram을 보여주는 것으로 둘 사이에 거의 구분이 없음을 알 수 있다. 신호 광원에 의한 BER(pulse source)과 추출된 광원에 의한

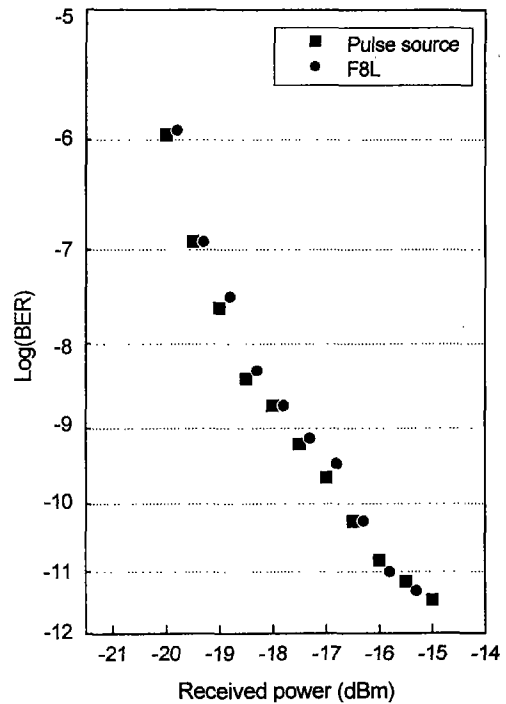


그림 11. 원래의 광원(pulse source)과 추출된 광원(F8L)의 BER.

BER(F8L)을 수신기의 입력 세기에 따라서 측정하고 그림 11에 나타내었다. 두 경우 모두 약간의 error floor가 나타나고 있으나 10^{-11} 이하의 BER에서 수신된 광세기의 패널티가 거의 없음을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 연구에서는 SLALOM을 포함한 8자형 레이저를 이용하여 10 GB/s RZ 신호에서 클럭을 추출하였고, 이 클럭의 품질을 평가하기 위하여 클럭을 변조하여 재생된 신호와 원래의 신호의 BER을 측정하였다. 그 결과 10^{-11} BER에서 광세기의 패널티가 거의 없어서 클럭 추출이 잘 되었음을 확인할 수 있었다. 이 CR 회로는 신호의 편광 상태에 따른 의존도 때문에 장시간 동작할 경우에는 모드 잠금이 깨질 수 있으므로 실제 시스템에 사용하기 위해서는 안정화 회로를 필요로 한다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D. Chiaroni, B. Lavigne, A. Jourdan, L. Hamon, C. Janz, and M. Renaud, in European Conference on Optical Communications '97 (Institution of Electrical Engineers, Edinburgh, UK, 1997), Th3B3.
- [2] B. Lavigne, P. Guerber, D. Chiaroni, C. Janz, A. Jourdan, B. Sartorius, C. Bornholdt, and M. Morhle, in European

- Conference on Optical Communications '99 (SEE, Nice, France, 1999), 262.
- [3] B. Sartorius *et al.*, Electron. Lett. **34**, 1664 (1998).
- [4] K. Smith and J. K. Lucek, Electron. Lett. **28**, 1814 (1992).
- [5] H. K. Lee, J. T. Ahn, M.-Y. Jeon, K. H. Kim, D. S. Lim, and C. H. Lee, IEEE Photon. Technol. Lett. **11**, 730 (1999).
- [6] S. Kawanishi *et al.*, Electron. Lett. **29**, 1714 (1993).
- [7] 김동환, 김상혁, 조재철, 최상삼, 한국광학회지 **10**, 507 (1999).
- [8] D. A. O. Davies, A. D. Ellis, T. Widdowson, and G. Sherlock, Electron. Lett. **31**, 111 (1995).
- [9] L. E. Adams, E. S. Kintzer, and J. G. Fujimoto, Electron. Lett. **32**, 1759 (1995).
- [10] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, New York, USA, 1995) Chapter 4.
- [11] B. Sartorius, C. Bornholdt, O. Brox, U. Feiste, and M. Mohrle, in European Conference on Optical Communications '99 (SEE, Nice, France, 1999), 264.

All optical clock recovery from 10 Gb/s RZ signal using an actively mode-locked figure eight laser incorporating a SLALOM

H. S. Chung[†], M. J. Chu, K. J. Kim, and J. H. Lee

*Optical Communications Department, Switching & Transmission Technology Lab.,
Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejon 305-350, KOREA*

[†]E-mail: hschung@etri.re.kr

(Received July 28, 2000 ; Revised manuscript received November 28, 2000)

All-optical clock recovery from a 10 Gb/s RZ signal has been demonstrated using an actively mode-locked figure-eight laser incorporating a semiconductor optical amplifier in the loop-mirror scheme. Optical pulses with 10 ps pulse width were modulated by a LiNbO₃ external modulator at 2²³-1 PRBS and injected into the clock recovery circuit to extract optical pulses with 12 ps width. Regeneration of the original bit pattern has been accomplished by modulating the recovered clock with the same modulator, and no power penalty was observed at 10⁻¹¹ BER.

OCIS codes : 060.2330, 060.5530, 140.3520.