

TOAD를 이용한 40 Gbit/s OPLL Clock Recovery 시스템에 대한 연구

기호진 · 전영민[†] · 변영태 · 우덕하

한국과학기술연구원 광기술연구센터
Ⓣ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

(2004년 8월 6일 받음, 2004년 11월 2일 수정본 받음)

40 Gbit/s 광 시분할 신호(OTDM:optical time-division-multiplexed)로부터 클럭 재생된 10 GHz 신호를 얻기 위해 고조모드잠금된 광섬유 레이저와 TOAD(Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer)를 이용하여 광 위상 동기 회로를 구성하였다. 입력된 40 Gbit/s 광 신호 펄스로부터 TOAD를 통과한 펄스의 위상 정보를 이용하여 10 GHz로 위상 동기된 신호를 추출하였다. 추출된 10 GHz RF 신호와 주변의 잡음 신호의 비는 40 dB 이상으로 측정되었다. 또한 TOAD에서 위상 정보 추출 과정에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 위상 동기 주파수의 작동범위는 입력 광 펄스의 기본 주파수를 중심으로 10 kHz 이내에서 측정되었다.

주제어 : OTDM, TOAD, PLL, Clock Recovery.

I. 서 론

초고속 전송 핵심 기술로는 초단 펄스 광원(ultrafast pulse generation), 광 시분할 다중화/역다중화 장치(all-optical multiplexing/demultiplexing), 그리고 광 동기 장치(optical timing extraction) 등의 기술이 요구된다. 그밖에 초단 펄스 증폭 및 전송 기술, optical linear or nonlinear(soliton) 전송, all optical repeating, all-optical regeneration, optical sampling 기술 등이 있다. 한편, 시분할 방식 역다중화를 위해서는 전송된 광 신호 펄스열에 위상 동기된 제어 펄스열을 추출하는 것이 중요한데, OTDM 기술이 DWDM 기술에 비해 발전 속도가 느린 것이 바로 펄스열의 동기화 기술이 어렵기 때문이다. 송신된 data 펄스열로부터 정확히 동기된 기본 주파수의 펄스열을 구동시킬 수 있는 장치를 Timing Extraction 또는 Clock Recovery 회로라 한다. Clock Recovery는 송신측에서 전송한 데이터의 심볼의 주기와 동기화를 이루기 위하여 사용한다. 이러한 초고속 광 신호 펄스열에서 동기화된 클럭 펄스 추출기술로는 optical tank circuit^[1], injection locking^[2], PLL^[3] 등이 알려져 있다. 이들 방법들은 각각의 장단점이 있으나, 실제 시스템에 적용될 경우 고속 동작이 가능하고 위상오차가 적은 장점을 가진 PLL 방식이 가장 이상적인 것으로 알려져 있다. 초고속 PLL 방식은 반도체 광증폭기나 광섬유에서 발생하는 비선형 광신호의 위상정보를 이용하여 동기신호를 추출하는 방법으로서 Electrical-PLL, LiNbO₃ 모듈레이터-PLL, XGM-PLL(Cross Gain Modulation-PLL)^[4], FWM-PLL(Four Wave Mixing-PLL) 방식 등이 있다. 그러나 XGM-PLL은 bit rate of 100 Gb/s에서 동작시키기 어렵고, FWM-PLL은 bit rate of 100 Gb/s 안정하게 작동하지만, FWM된 광

의 상대적으로 낮은 전환 효율에 의한 한계가 있다.

본 실험은 이러한 방법을 개선시킨 것으로 Sagnac loop mirror내에 반도체 광 증폭기(SOA)를 설치한 TOAD-PLL 방식을 사용했다. 이 방식은 FWM-PLL 방식보다 뛰어난 전환 효율과 매우 적은 timing jitter을 얻을 수 있고, 기존의 TOAD-PLL 방식^[5]과의 차이는 회로내의 기준 진동자가 없고 클럭 광 레이저가 VCO의 주파수 변동에 영향을 받지 않는다^[6]. 이 연구는 유리수 고조모드잠금된 광섬유 레이저(ML-EDFL : Mode-Locked Er-Doped Fiber Laser)^[7]를 사용해서 10 GHz의 변조 주파수로 40 Gbit/s의 광 펄스열을 발생시켜서 이에 동기된 10 GHz 진동자 신호(VCO signal)를 얻는 TOAD-PLL 시스템^[8]의 특성에 대한 연구이다.

II. TOAD 구성과 시뮬레이션

TOAD는 루프 내 SOA의 광 비선형 현상을 이용한다. 그림 1에서 하나의 directional 5:5 coupler를 사용해 원형 루프 미러를 만들었다. 루프는 SOA와 PC를 포함하고 있고 루프 내에 입력 signal(electrical field $E_{in(t)}$)이 들어오면 커플러를 지나면서 clockwise(S_1)과 counter clockwise(S_2) 신호로 나누어진다.

만약, 루프 내에 SOA가 포함되지 않았다면, 이 신호들은 한번 원을 돌고 나서 다시 coupler에서 합쳐진 후 다시 들어온 방향으로 나갈 것이다. 그러나 SOA를 넣어주게 되면서 이들은 다른 현상을 나타내게 된다. time constant τ_c 와 더불어 gain recover는 SOA에서 수백 pico seconds가 된다. control 펄스가 루프내에 삼입이 되면, 이 루프를 TOAD라고 부른다. 루프내에 커플러를 덧붙이고 control 펄스를 루프내에 넣어주게 되면, 이때 control 펄스는 SOA 방향으로 나아가게 되어 있다. 만약 data 펄스와 다른 파장의 펄스가 사용된다면 wave-

[†] E-mail: ymjhon@kist.re.kr

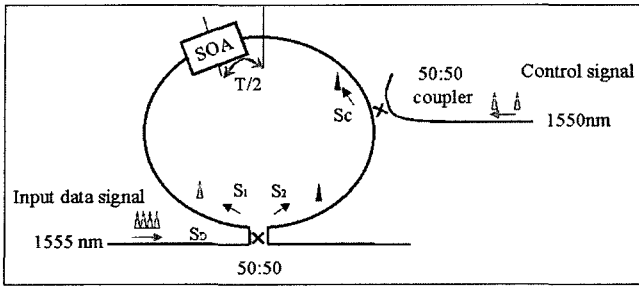


그림 1. TOAD의 기본 구성도.

length selective 커플러를 사용하거나 TOAD의 output 부분에 필터를 사용해서 control 펄스가 TOAD의 출력 부분에서 미치는 영향을 막을 수 있다.

한편 루프에서 SOA의 위치는 매우 중요하다. SOA의 위치와 관련하여 두 가지 작동 속도로 구분을 할 수 있는데, SOA의 위치 T가 gain recovery time τ_c 보다 더 클 때는 보통 medium switching periods(약 100 ps) 이라 하고, 만약 T가 τ_c 보다 더 작을 때는 very short switching periods(약 10 ps)라

고 한다.

그림 2는 상용 시뮬레이터인 VPI를 이용한 TOAD 시뮬레이션의 결과 그림이다. TOAD로 입력된 data 펄스는 40 Gbit/s (1555 nm, 6 ps)의 펄스열, control 펄스는 10 Gbit/s(1550 nm, 8 ps)의 펄스열, SOA에서의 gain saturation time는 900 ps로 각각 놓고, 이 두 신호가 SOA에서 시간과 파워에 따른 클럭 추출에 관하여 모델링 하였다. (a)는 data input 펄스 40 Gbit/s 로써 펄스의 패턴은 1111 1111 1111 1111로 이루어졌다. (b)는 control 펄스 10 Gbit/s의 신호를 나타내고, (c)는 TOAD내의 SOA에서 data input 펄스와 control 펄스의 carrier density의 모습을 보여주고, (d)는 data 펄스의 TOAD output 펄스를 나타낸다.

그림 3의 (a)는 data 펄스를 40 Gbit/s의 16 bit의 패턴으로 변형시켜 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 그림이다. 이 data input 펄스의 패턴은 1100 0010 1011 1110로 이루어졌다. (b)는 control 펄스 10 Gbit/s의 신호, (c)는 TOAD내의 SOA에서 16bit data input 펄스와 control 펄스의 carrier density, (d)는 data 펄스의 TOAD output 펄스를 각각 나타낸다.

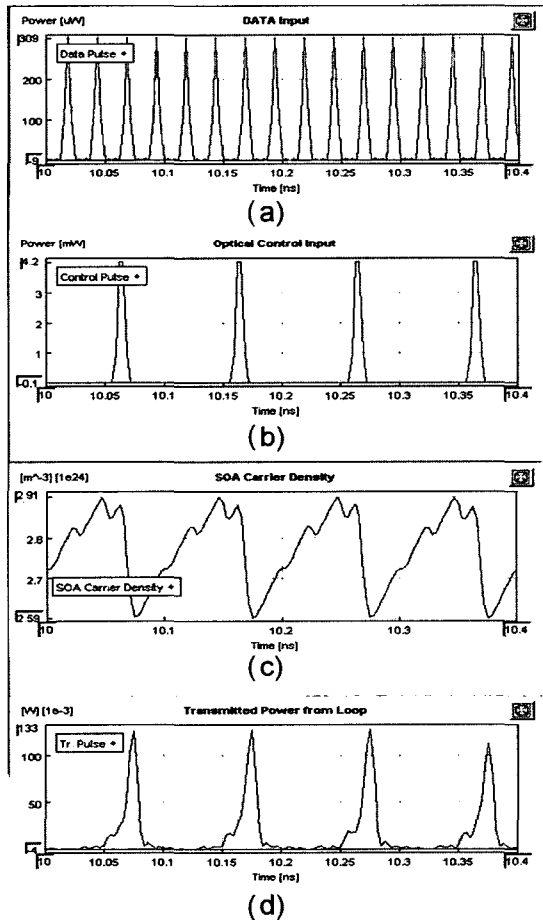


그림 2. TOAD의 시뮬레이션 (a) 40 Gbit/s data pulse, (b) 10 Gbit/s control pulse, (c) carrier density in SOA, (d) transmitted pulse of TOAD.

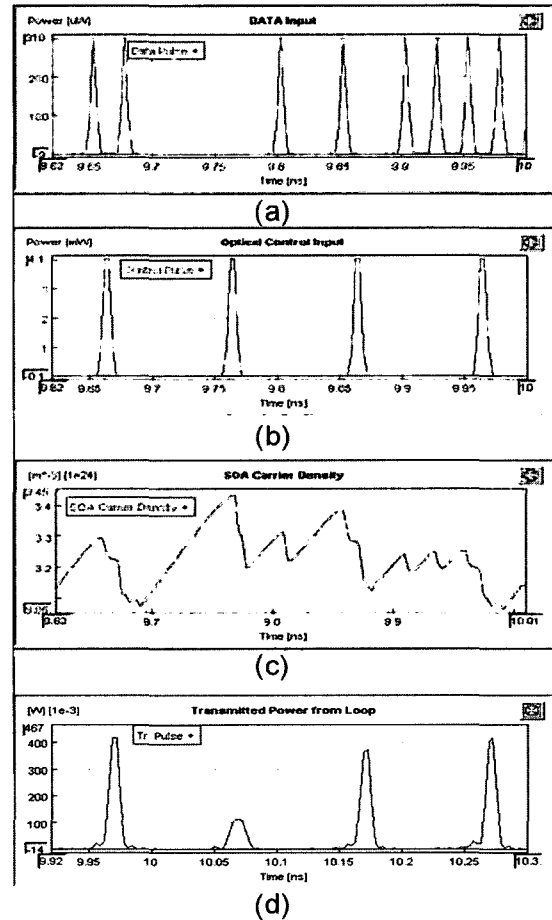


그림 3. TOAD의 시뮬레이션, 16bit 패턴 (a) 40 Gbit/s data pulse, (b) 10 Gbit/s control pulse, (c) carrier density in SOA, (d) transmitted pulse of TOAD.

III. 실험 장치 및 방법

본 실험은 입력 광 펄스열의 시간에 따른 위상 변화를 정확히 검출하여 입력 광 펄스열과 정확히 동기된 채널 분리용 광 펄스를 재생하는데 목적이 있다. 즉 송신된 40 Gbit/s 펄스열로부터 정확히 동기된 기본 주파수의 10 Gbit/s 펄스열을 구동시킬 수 있는 전기 신호를 발생시키는 장치인 VCO를 구동시키는 것이 PLL이고, 또한 PLL로 들어가는 400 kHz의 신호를 추출하기 위해서 스위칭 소자로써 TOAD를 사용하였다.

특히 본 PLL 구조는 회로내의 기준 진동자를 없애고 신호 광파-클럭광의 상호 연관 신호와 클럭광 신호-VCO의 상호 연관 신호를 비교하는 방식을 취하였다. 따라서 본 장치에서 고조모드잠금된 광섬유 레이저는 최적의 모드 잠금 주파수에서 연속 발전할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그림 4는 전체 실험 구성도이다. 장치의 구성은 40 Gbit/s의 광 신호 펄스열을 얻기 위해 유리수-고조모드잠금된 광섬유 레이저(ML-EDFL : Mode-locked Er-doped fiber Laser)를 사용해서 40 GHz 모드잠금된 주파수를 얻었다. 클럭 레이저 광으로 사용되는 고조모드잠금된 광섬유 레이저는 최적의 모드잠금 주파수에서 연속 발전되므로 상대적으로 클럭광에서 오는 시간 지터 효과를 줄일 수 있다. data 펄스는 40 Gbit/s(1555 nm, 6 ps)로 시분할 다중화된 출력 펄스열이다. 또한 그림 4의 윗부분은 PLL회로 내에 위치한 클럭 펄스발생기로써 10 Gbit/s(1550 nm, 8 ps)펄스열을 만들어낸다. 이는 data 펄스 발생기와 같은 구조의 고조모드잠금된 광섬유 레이저를 사용하였다. 편광 조절기는 펄스열 출력의 가는 선폭을 유지하기 위해서 TOAD 내부와 data 펄스 입력단, control 펄스 입력단에 각각 편광 조절기(polarization controller)를 설치하였다.

편광 조절기를 지나고 3-dB 광섬유 커플러를 통과한 data signal(-1 dBm)은 signal 펄스 1(S₁)과 signal 펄스 2(S₂)로 나누어지고, 또한 control 펄스(9 dBm)는 3-dB 광섬유 커플러를 통해서 루프내로 들어온다. TOAD 내에서 SOA의 위치는

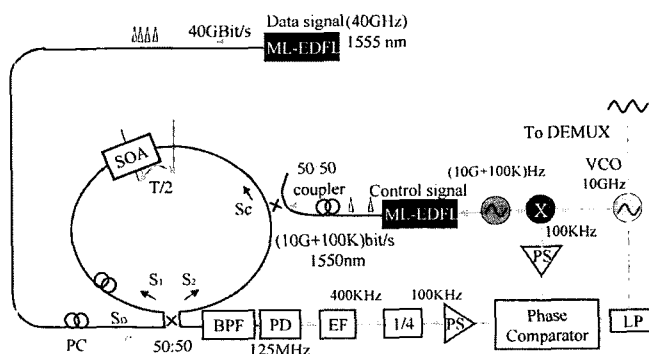


그림 4. 40 Gbit/s 위상 동기 회로 실험 장치도(PC: polarization controller, OF: optical filter, PD: photodiode, EF: electrical filter, PS: pulse shaper, LF: loop filter, LO: local oscillator).

중요하다. 여기서는 중심에서 T/2만큼 왼쪽으로 치우쳐있어, S₁과 S₂의 SOA 도달시간이 T만큼 차이가 난다.

S₁ 신호가 먼저 SOA(Model : Samsung OA40B3A)를 통과하고 바로 control signal이 뒤이어 SOA를 지나면서 SOA 이득을 차지하게 된다. 이때 다시 S₂ 신호가 SOA를 통과하는데 이 신호는 이득을 거의 얻지 못해서 S₁ 신호와 3-dB 커플러에서 다시 만났을 때 power의 차이로 인해서 3-dB 커플러의 출력단으로 스위칭된 data 펄스와 control 펄스 신호가 빠져나간다.

여기서 사용한 SOA는 fiber-to-fiber 이득이 23 dB이고 gain recovery time이 1 ns 이다. TOAD에서 나온 출력 signal 중 입력 data 신호만을 분리하기 위해 1.2 nm의 밴드 폭을 갖는 광 필터를 사용하여 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 성분을 제거한 후 1555 nm의 data 신호(10 Gbit/s)만을 추출한 후 이를 다시, 125 MHz 밴드폭을 갖는 저속 InGaAs/PIN 광 검출기(APAC Opto Elect., P328PF14A2)와 전기적 밴드 패스 필터(EBPF)를 사용하여 4f(=400 kHz)와 비교하기 위해 다시 전기적으로 4분배하고 TTL 논리 소자를 이용하여 100 kHz의 구형파로 만들었다. 한편, (10 G+100 k)Hz로 변조된 클럭 광 펄스의 주파수 성분과 초기 10 GHz로 임의 초기화된 VCO의 주파수와 RF 혼합기(Miteq, DM0812LW2)에서 발생하는 저주파수 성분인 f를 추출하고 이를 다시 구형파로 만들어 위상 비교기로 보내 신호광-클럭광 상호 연관 신호와 클럭 펄스-VCO 상호 연관 신호의 위상을 비교하였다.

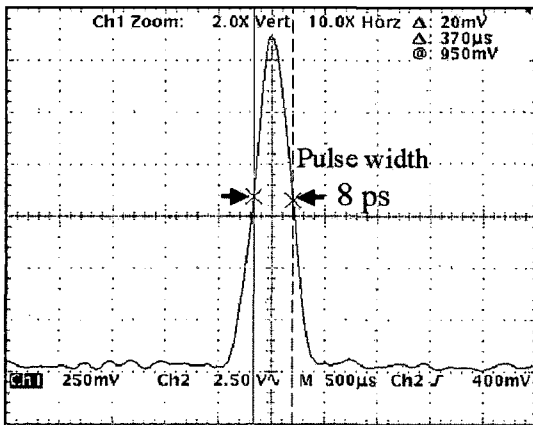
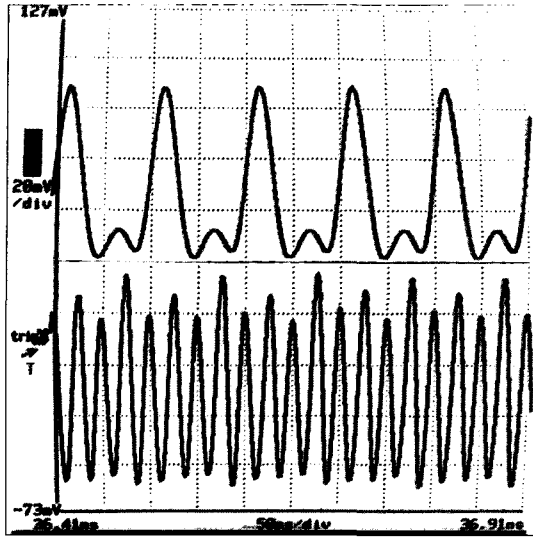
이 때, 위상비교기의 출력은 입력 구형파의 위상차에 비례하는 duty 비율의 구형파를 내보내는데, loop 필터회로를 제작하여 이러한 duty 비율에 비례하는 DC 성분의 전압신호를 만들어서 이를 VCO 진동자(Magnum Microwave, MDR 3001-02)에 걸어주면 입력 신호광의 위상변화에 따라 VCO의 중심 주파수가 궤환 루프를 돌면서 변화한다. 따라서 PLL 회로에서 추출한 40 Gbit/s data 펄스와 위상 동기된 10 GHz VCO의 진동자 파형을 얻을 수 있다.

IV. 실험 결과 및 논의

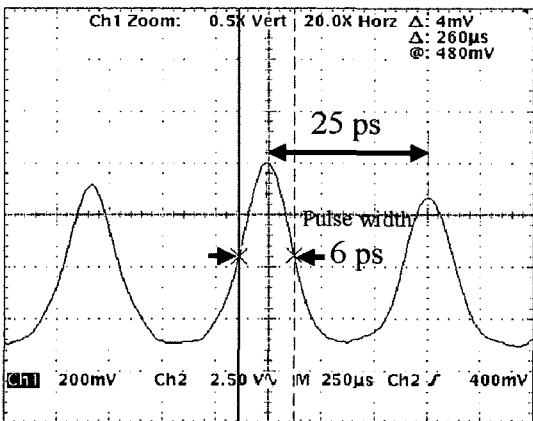
40 Gbit/s의 광 신호 펄스열을 얻기 위해 약 10 GHz의 RF 신호를 광세기 변조기에 인가함으로써 유리수-고조모드잠금된 광섬유 레이저(ML-EDFL : Mode-Locked Er-Doped Fiber Laser)를 사용해서 40 GHz의 반복률을 가지며 짧은 펄스폭을 가지는 40 GHz 모드잠금된 주파수를 얻었다. 그림 5는 샘플링 스코프와 오토코릴레이터를 사용해서 이 펄스열을 측정된 그림이다.

그림 6은 그림 1에서 설명한 바와 같이 40 Gbit/s의 data 펄스와 10 Gbit/s의 control 펄스가 다시 5:5 커플러에서 다시 만나게 되었을 때, output 라인 쪽으로 스위칭 된 TOAD output signal인 10 Gbit/s를 나타내고 있다.

그림 7의 (a)는 40 Gbit/s의 입력 data signal과 10 GHz + 100 kHz의 control 펄스 신호가 TOAD를 통과한 후 1.2 nm



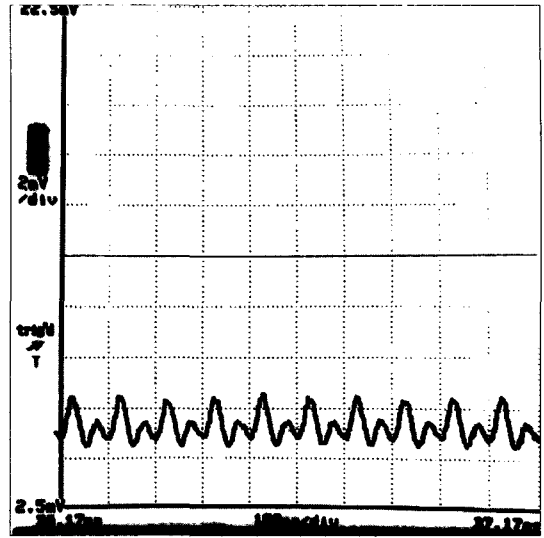
(a)



(b)

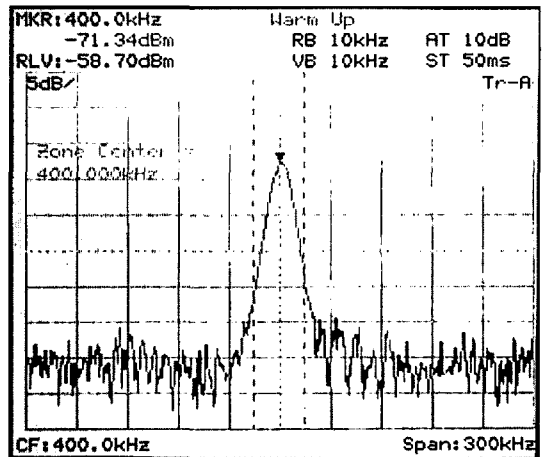
그림 5. (a) 10 GHz control signal pulses(위, 8 ps)와 (b) 40 Gbit/s data signal pulses(아래, 6 ps).

밴드폭의 광 필터를 이용하여 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 성분을 제거한 후, 1555 nm의 data 신호(10 Gbit/s)만을 추출, 이를 125 MHz 밴드폭을 갖는 저속 InGaAs/PIN 광 검출기(New focus, 1811)와 전기적 밴드 패스 필터(EBPF)

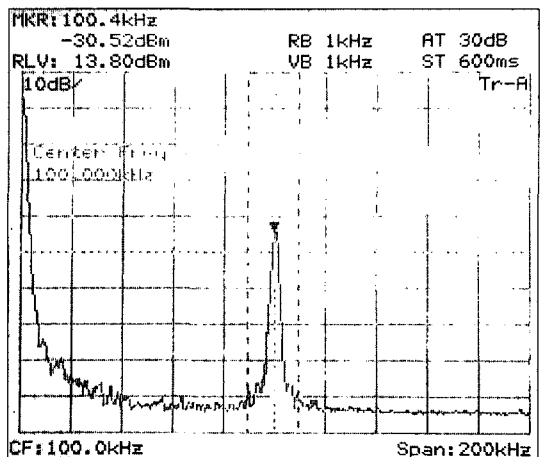


(a)

그림 6. 10 Gbit/s의 TOAD output signal.



(a)



(b)

그림 7. (a) PLL 회로내에서 400 kHz TOAD 출력, (b) PLL 회로 내에서 나누어진 100 kHz RF spectrum.

를 사용하여 $4f(=400 \text{ kHz})$ 성분의 정현파 성분의 신호를 측정하는 그림이다. 이 신호가 PLL 회로 내로 들어가게 되면, $f(=100 \text{ kHz})$ 와 비교하기 위해 다시 전기적으로 4분배하고 TTL 논리 소자를 이용하여 100 kHz의 구형파로 만들었다. 그림 7의 (b)는 이 100 kHz를 측정한 파형이다.

그림 8은 위상 동기된 VCO의 RF 스펙트럼을 나타내는 것으로서 중심주파수는 10 GHz이고 화살표로 옘셋 주파수 성분인 100 kHz 성분도 나타내고 있음을 보여주나 중심주파수 성분과는 약 40 dB 정도로 차이가 크다. 그림 9에서 40 Gbit/s 급의 신호 광 펄스열과 PLL 회로에서 추출한 위상 동기된 VCO의 진동자 파형을 샘플링 오실로스코프로 측정하여 나타내었다. 이미 보고된 10 GHz 광 PLL 시스템에서 측정된 바와 같은 방법⁹⁾으로 입력 신호광의 위상 변화를 유도하기 위해 입력광 펄스열의 주파수를 변화시켜 VCO의 진동자 파형의 변화를 관측한 위상 동기 주파수 범위는 약 10 kHz로

측정되었다. 따라서 본 시스템의 허용 입력 주파수의 변화 범위는 10 kHz 이고, 이는 클럭 레이저로 사용된 광섬유 레이저의 lock-in 주파수 범위인 200 kHz 이내에 드는 범위이다. 그림 10은 PLL 실험 장치의 사진이고, 그림 11은 TOAD를 사용한 OPLL의 클럭 재생 실험 장치의 그림이다.

V. 결 론

새로운 OTDM 프레임 동기화 방법으로, TOAD를 이용한 TOAD-PLL 방식을 사용했다. 40 Gbit/s 광 신호 펄스열로부터 TOAD를 이용하여 이에 위상 동기된 10 GHz의 VCO 진동자 신호를 추출하였다. PLL작동을 위해서 data signal과 control signal 사이에 상호 연관하는 고속 스위칭을 위해 TOAD를 사용한 이 방식은 FWM-PLL 방식보다 뛰어난 전환 효율 뿐 아니라 기존의 PLL방식을 보완하여 회로내의 기존 진동자를 없애고 신호광-클럭광의 상호 연관 신호와 클럭광 신호-VCO의 상호 연관 신호를 비교하는 방식을 사용하여 클럭 광 레이저는 VCO의 주파수 변동에 영향을 받지 않는다. 추출된 10 GHz RF 신호와 주변의 잡음 신호의 비는 40 dB 이상으로 측정되었고, TOAD에서 위상 정보를 추출하는 과정과 입력 광 펄스와 제어 광 펄스에 대한 SOA에서의 이득 변화를 시뮬레이션 하였다. 위상 동기 주파수의 작동범위는 입력 광 펄스의 기본 주파수를 중심으로 10 kHz 이내에서 측

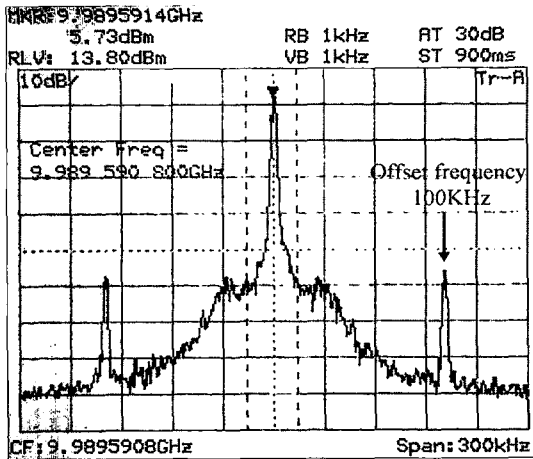


그림 8. 10 GHz VCO 출력의 RF spectrum과 100 kHz sideband components.

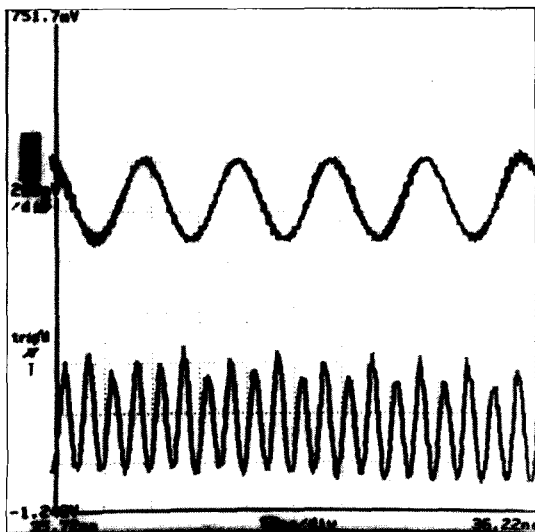


그림 9. 동기된 10 GHz VCO 출력 신호 (위)와 40 Gbit/s 광 signal pulse (아래).

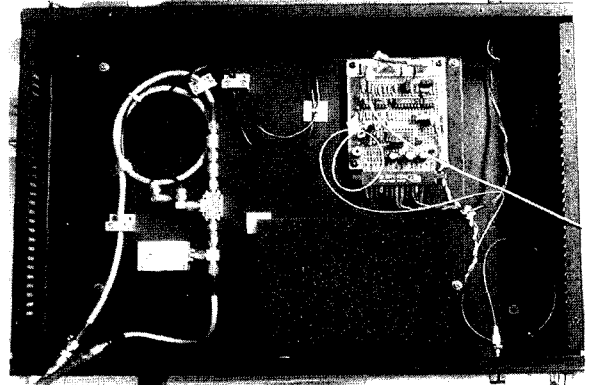


그림 10. PLL 실험 장치.

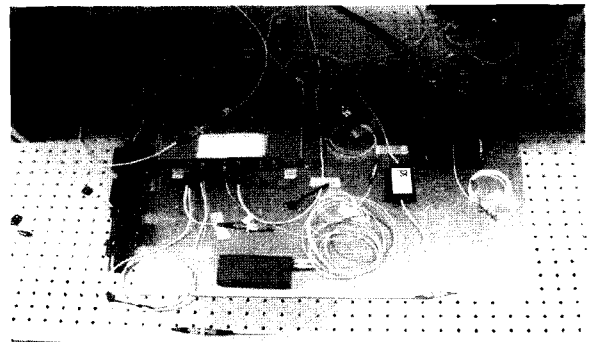


그림 11. TOAD를 사용한 OPLL의 클럭 재생 실험 장치.

정되었다.

이러한 위상 동기회로는 OTDM 전송시스템에서 역다중화 부분에 제어신호로서 이용될 것이며, 광통신과 초고속 신호 처리에 유용한 동기화 모듈로서 사용하는데 매우 유용할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] Y. Miyamoto, H. Kawakami, T. Kataoka, and K. Hagimoto, "New Optical Frequency Comb Gain Spectrum Generated by Stimulated Brillouin Amplifier," in *Tech. Dig. Optical Amplifiers and their Applications, OSA Tech. Dig.*, vol. 14, p. 194, 1993.

[2] D. M. Patrick, "Mode-Locked Ring Laser using Nonlinearity in a Semiconductor Laser Amplifier," *Electron. lett.*, vol. 30, pp. 43-44, 1994.

[3] Osamu Kamatani, and Satoki Kawanishi, "Ultrahigh-Speed Clock Recovery with Phase Lock Loop Based on Four-Wave Mixing in a Traveling-Wave Laser Diode Amplifier," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 1757-1767, 1996.

[4] Satoki Kawanishi, and Masatoshi Saruwatari, "Ultra-High-Speed PLL_type Clock Recovery Circuit Based on All-

Optical Gain Modulation in Traveling-Wave Laser Diode Amplifier," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, pp. 2123-2129, Dec. 1993.

[5] Zhou Xiang, Peida Ya, K. J. Guan, and J. T. Lin, "Theory of Ultrahigh-Speed Clock Extraction with Phase Lock Loop based on a Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer," *Optics Comm.*, vol. 159, pp. 53-57, 1999.

[6] Dong Hwan Kim, Sang Hyuck Kim, Jae Cheol Jo, Young Min Jhon, Bong Kyu Kim, and Sang Sam Choi, "40GHz Optical PLL based on Four-Wave-Mixing in a Semiconductor Optical Amplifier," *LEOS 99, TuZ4*, pp. 347-348, 1999.

[7] 이유승, 전영민, 김동환, 장지웅, 조운조, 이 석, "10 GHz 로 고조모드록킹된 고리형 어븀첨가 광섬유 레이저의 이론적 해석 및 향상된 공진기 설계," *한국광학회지*, vol. 11, pp. 353-358, 2000.

[8] Y. M. Jhon, H. J. Ki, S. H. kim "Clock Recovery from 40Gbps Optical Signal with Optical Phase Lock Loop Based on a Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer," *Optics Comm.*, vol. 220, pp. 315-319, 2003.

[9] 김동환, 김상혁, 조재철, 최상삼, "반도체 광증폭기에서 발생된 4광파 혼합 신호를 이용한 10 GHz 위상 동기 루프", *한국광학회지*, vol. 10, pp. 507-334, 1999.

Theoretical and experimental study on ultrahigh-speed clock recovery system with optical phase lock loop using TOAD

Ho Jin Ki, Young Min Jhon[†], Young Tae Byun, and Deok Ha Woo

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology 39-1 Hawolkok-dong Seongbuk-ku, Seoul 136-791, Korea

[†]E-mail: ymjhon@kist.re.kr

(Received August 6, 2004, Revised manuscript November 2, 2004)

10 GHz clock recovery from 40 Gbit/s optical time-division-multiplexed(OTDM) signal pulses was experimentally demonstrated using an optical phase lock loop based on a terahertz optical asymmetric demultiplexer(TOAD) with a local-reference-oscillator-free electronic feedback circuit. The 10 GHz clock was successfully extracted from 40 Gbit/s signals. The SNR of the time-extracted 10 GHz RF signal to the side components was larger than 40 dB. Also we performed numerical simulation about the extraction process of phase information in TOAD. The lock-in frequency range of the clock recovery is found to be 10 kHz.

OCIS Codes : 060.0060, 060.2330.