

초고속 광시분할 다중시스템의 DEMUX용 40GHz 위상 동기 회로

김동환[†] · 김상혁 · 조재철 · 최상삼

한국과학기술연구원 광기술연구센터
(136-791) 서울시 정북구 하월곡동 39-1번지

(2000년 6월 21일 받음, 2000년 8월 25일 수정본 받음)

40 Gbit/s 속도의 시분할 다중화(OTDM)된 광펄스 신호열로부터 반도체 광증폭기의 4광파 혼합 신호에 포함된 위상정보를 이용하여 10GHz로 위상 동기된 진동자 신호를 추출하였다. 제작된 위상 동기 회로는 5시간이상 안정되게 동작되었고, 위상 동기 주파수의 작동범위는 입력 광펄스의 기본 주파수의 10KHz 이내로 측정되었다.

OCIS codes : 060.2330, 060.4510, 190.4380, 320.7110 320.7130

I. 서 론

최근 인터넷 인구의 폭증과 더불어 수천 만대 이상의 컴퓨터를 연결하는 초고속 통신망기술에 대한 연구가 차세대 멀티미디어 정보 통신 시스템 구축을 위한 코어 기술로서 활발히 연구되어 테라 비트 전송기술도 일부 선진국에서 구현되고 있다. 이러한 초고속 통신망 구축을 위한 신호 채널의 다중화 방식으로는 WDM(Wavelength Division Multiplexing)과 OTDM(Optical Time Division Multiplexing) 기술이 연구되고 있는데, WDM 기술은 광신호 채널을 파장 단위로 나누어 취급하는 협대역 파장 펄스 기술이므로 기존의 통신망(TDM)과는 새로운 기술인 반면에, OTDM 기술은 극초단 펄스기술로서 광신호 채널을 시간축상에서 다중화시키므로 기존의 TDM 기술의 연장선에 있어서 기존의 전송 시스템을 새로이 구축하지 않아도 된다. 그러나, 테라 비트 광전송을 위해서는 각각의 기술이 서로 상호 보완적으로 융합하여야 하며, 최근의 NTT 그룹에서 보고한 3Tbit/s 광전송 실험도 19채널의 WDM과 160Gbit/s급의 OTDM 방식이 혼합된 결과이다.^[1]

최근 OTDM 기술은 Kawamshi등에 의해 초단 광펄스열을 이용하여 단일 채널에서 200 Gbit/s-100 km 광신호 전송에 성공하였으며,^[2] 수퍼컨티뉴 펄스발생기를 이용하여 400Gbit/s-40km 전송에 성공하였다고 보고된 바 있다.^[3] 이러한 OTDM 전송 기술의 핵심은 초단 펄스열 발생, 다중화, 전송, 동기화 및 역다중화 기술이 해결해야 할 과제이다. 따라서, OTDM 시스템에 포함된 핵심 기술의 발전은 단지 광통신 기술 분야 뿐만 아니라 광소자 특성 평가나 초고속 신호 처리에 관련된 타 분야 기술에도 파급 효과가 크다.

초단펄스 발생기는 장거리 전송을 위해 주파수 처핑이 없는 수 피코초 이하의 10 Gbit/s급 이상의 펄스 발생기가 요구되는데 현재로서는 고조파 모드 록킹된 광섬유 레이저가 가장 안정된 펄스 발생기로 알려져 있다. 그러나, 단일 채널의 정보량을

극대화시키기 위해서는 서브 피코초 펄스 발생기가 필요하므로 이를 위해서는 수 피코초 정도로 최대한 펄스폭을 줄인 광섬유 레이저 펄스열을 다시 DDF(Dispersion Decreasing Fiber)등의 특수 광섬유를 이용하여 솔리톤 펄스 압축기를 이용하여 수백 펨토초의 광 펄스열을 발생시킨다.^[4] 한편, 시분할 방식 역다중화를 위해서는 전송된 광 신호 펄스열에 위상 동기된 제어 펄스열을 추출하는 것이 중요한데, OTDM 기술이 WDM 기술에 비해 발전 속도가 느린 것이 바로 궁극적으로 펨토초 펄스열의 동기화 기술이 난제이기 때문이다. 이러한 초고속 광 신호 펄스열에서 동기화된 클럭 펄스추출기술로는 optical tank circuit,^[5] injection locking,^[6] PLL^[7-8] 등이 알려져 있다. 이들 방법들은 각각의 장단점이 있으나, 실제 시스템에 적용될 경우 신뢰성 및 반복성을 고려할 때 PLL 방식이 가장 유력한 것으로 알려져 있다. 초고속 PLL 방식은 반도체 광 증폭기나 광섬유에서 발생하는 비선형 광신호의 위상정보를 이용하여 동기신호를 추출하는 방법으로서 FWM-PLL(Four Wave Mixing-PLL)^[7]과 XGM-PLL(Cross Gain Modulation-PLL)^[8] 방식으로 나누어지나, 테라 비트 광신호 처리를 위해서는 반응시상수가 서브 피코초인 carrier heating, spectral hole burning 등의 현상을 수반하는 FWM-PLL방식이 가장 널리 사용된다.

본 논문에서는 10 Gbit/s 급의 고차 모드 록킹된 광섬유 레이저 펄스열을 다중화하여 40 Gbit/s 급의 광 펄스열을 발생시켜서 이에 동기된 10 GHz 진동자 신호(VCO signal)를 얻는 FWM-PLL 시스템의 특성에 대해 논한다.

II. 40 GHz 광 PLL 시스템

초고속 광 PLL의 기본 원리는 다중화된 입력 광펄스열과 PLL 회로안에 위치한 클럭 광펄스열과의 저주파수 성분의 상호 연관 신호(cross-correlation signal)에 포함된 위상정보를 비교하여 VCO에 제한시켜 입력 광 펄스 신호에 위상 동기된 클럭 주파수 성분을 추출하는 방법이다.^[9] 이때에 초고속 입력 신호의 위상 정보는 반도체 광 증폭기에서 발생된 저주파 성

[†]E-mail: dhwan@kist.re.kr

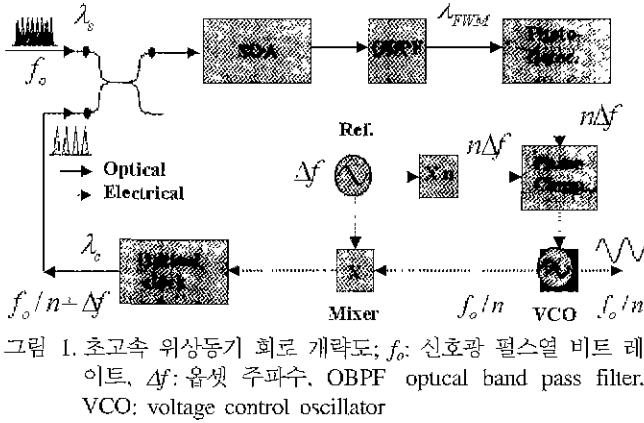


그림 1. 초고속 위상 동기 회로 개략도; f_0 : 신호광 펄스열 비트 레이트, Δf : 옵셋 주파수, OBPF: optical band pass filter. VCO: voltage control oscillator

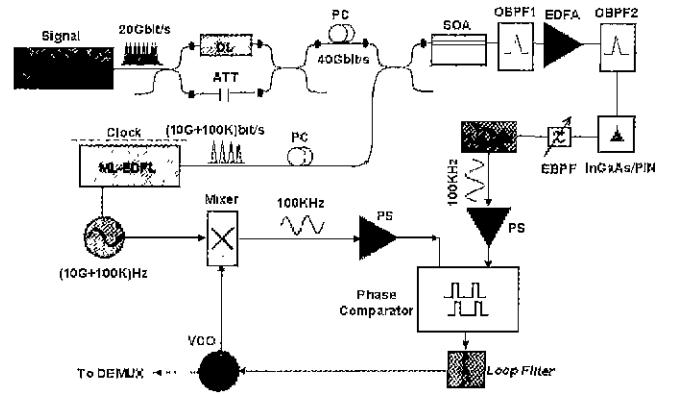


그림 2. 40 GHz 위상 동기 회로 실험 장치도; DL: delay line, ATT: attenuator, EBPF: electrical band pass filter, PS: pulse shaping block

분의 4광파 혼합신호를 이용한다.

그림 1은 Kawanishi 등이 제안한 초고속 PLL 회로에 대한 모식도이다.¹¹⁾ 여기서 f_0 는 OTDM 전송 시스템에서의 단일 채널 비트 레이트가 f_0/n 인 n 개의 채널로 시분할 다중화된 신호광의 비트 레이트이고, Δf 는 수십내지 수백 KHz 대역의 offset 주파수이다. 입력 광펄스열을 가우시안 형태로 가정할 때 이를 f_0 의 푸리에 급수로 다음과 같이 전개 할 수 있다.

$$I_{sig}(t) = I_0 \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi k f_0 t) \right] \quad (1)$$

마찬가지로 PLL 회로안에 위치한 클럭 레이저의 펄스열도 $f_0/n + \Delta f$ 성분의 푸리에 급수로 전개된다.

$$I_{clk}(t) = I_0' \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos[2\pi k'(f_0/n + \Delta f)t] \right] \quad (2)$$

따라서, 반도체 광 증폭기를 이용한 4광파 혼합신호를 이용하면, 신호광의 기본 주파수 성분 ($k=1$)과 클럭광의 n 번째 고차 조화파 성분 ($k'=n$)과의 상호 연관 신호로부터 저주파 성분 ($n\Delta f$)의 입력광에 대한 위상 정보를 얻을 수 있다. 위상 검출기로 사용되는 반도체 광증폭기에서 발생하는 4광파 혼합신호의 세기는 펌프광의 제공에 비례하고 프로브광에 대해 선형적으로 비례하므로 초고속 입력광을 프로브광으로, 클럭광을 펌프광으로 하면 발생하는 offset 주파수 성분 ($n\Delta f$) 근처의 4광파 혼합 신호의 세기는 다음의 항에 비례한다.

$$I_{FWM} \propto I_{sig}(t) \cdot I_{clk}(t)^2 \propto I_0 I_0'^2 a_1 b_n \cos(2\pi n \Delta f t) \quad (3)$$

따라서, 신호광-클럭광의 저주파 성분 비트 신호 주파수는 $n\Delta f$ 이므로 이를 기준 진동자의 옵셋 주파수 (Δf)의 n 배에 해당하는 전기적 신호와 위상 비교하여 이에 비례하는 전압신호를 폐환하여 기본 주파수 (f_0/n)를 내는 VCO 진동자 주파수를 제어한다. 그런데, 그림 1에 나타난 PLL 회로에서 보통, 클럭 펄스 발생기로서 고차 조화 모드 록킹된 광섬유 레이저 (harmonically-mode-locked fiber laser)를 사용하므로 슈퍼 모드 비팅(supermode-beating)이나 relaxation oscillation 효과가 최소화되기 위해서는 레이저 변조 주파수가 광섬유 레이저

의 공진기 길이에 정수배로 정확히 맞아야 한다. 따라서 위와 같은 PLL 구조는 VCO에 의해 클럭 레이저 주파수를 계속 변화시키므로 입력신호의 주파수나 위상변화가 있을시 클럭 펄스에서 시간 지터(temporal jitter)가 증가되어 전체 PLL 시스템의 작동에 영향을 미칠 수 있다.

다음은 위의 PLL회로의 단점을 보완하기 위해 새로이 제안된 초고속 PLL회로를 그림 2에 나타내었다.¹¹⁾ 본 PLL 구조가 Kawanishi 등이 제안한 PLL회로와 다른 점은 회로내의 기준 진동자를 없애고 신호광-클럭광의 상호 연관 신호와 클럭광 신호-VCO의 상호 연관 신호를 비교하는 방식을 취했으므로 클럭광 레이저는 VCO의 주파수 변동에 영향을 받지 않는다. 따라서, 클럭 레이저광으로 사용되는 고차조화 모드 록킹된 광섬유 레이저는 최적의 모드 록킹 주파수에서 연속 발진되므로 상대적으로 클럭광에서 오는 시간 지터효과를 줄일 수 있다.

40 Gbit/s급의 광신호 펄스열을 얻기 위해 20 Gbit/s급 유리-고차수 모드 록킹된 광섬유 레이저(rationally-harmonically mode-locked fiber laser) 펄스열을 2채널로 시분할 다중시켰다. 이때 20 Gbit/s급 광신호 펄스열은 레이저 공진기내에 10 GHz 광세기 변조기를 이용하여 얻을 수 있는데 $f_m (=m\Delta f_{cm})$ 과 Δf_{cm} 를 각각 고차조화 변조 주파수와 레이저 공진기 주파수라고 정의하면, 광변조기의 주파수를 $f_m + \Delta f_{cm}/n$ 만큼 걸어주면 $(nm+1)\Delta f_{cm}$ 에서 고차 조화 모드 록킹이 이루어 지므로(이때 m, n 은 정수) $n=2$ 인 경우 10 GHz 변조주파수에서 20 GHz 모드 록킹 주파수가 가능해 진다.¹²⁾ 그림 3(a)은 본 실험에 사용된 고차 조화 모드 록킹된 광섬유 레이저의 개략도이고, 그림 3(b), (c)는 각각 40 Gbit/s로 시분할 다중화된 출력 펄스열을 45GHz 고속 광검출기(New focus, 1014)와 50 GHz 샘플링 오실로스코프(Tektronix, CSA803)를 이용하여 측정된 파형과 auto-correlator로 측정된 펄스 형태를 나타내고 있다. 40 Gbit/s급 신호광 펄스열의 파장은 1553.2 nm이고 펄스폭과 스펙트럼 폭은 각각 8ps, 0.43 nm(54 GHz)이며 시간-밴드폭은 0.43으로서 가우시안 펄스형을 가정할 때, 주파수 처핑이 없는 transform-limited 펄스이다. 한편 PLL 회로내에 위치한 클럭 펄스 발생기는 같은 구조의 10 Gbit/s급 고차조화 모드록킹된

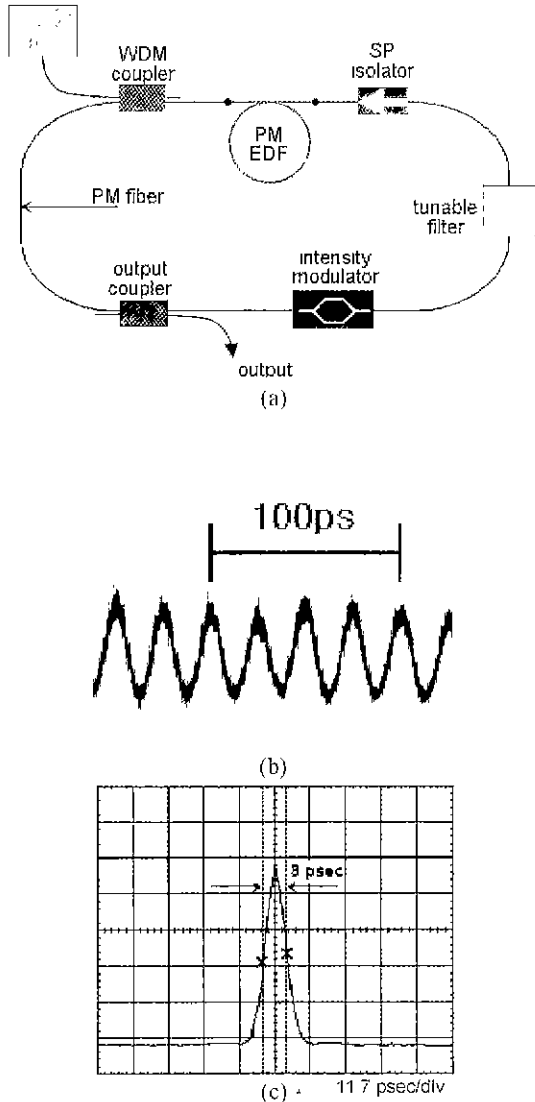


그림 3. (a) Schematic diagram of rational harmonic mode-locked fiber laser, (b) 40 Gbit/s 시분할 다중화된 광신호 펄스열, (c) autocorrelation trace of the signal pulse (pulsewidth = 8 ps).

광섬유 레이저를 사용하였으며, 1549.4 nm에서 발진하도록 하였으며 펄스폭과 스펙트럼폭은 각각 10 ps, 0.5 nm로서 시간-밴드폭 곱이 0.45로서 거의 transform-limited 펄스열이다.

40 Gbit/s 급의 신호광 펄스열의 위상검출기로는 반도체 광 증폭기를 사용하여 클럭광과 신호광과의 상호 연관 신호인 4 광파 혼합 신호를 얻었다. 여기서 사용된 반도체 광증폭기는 Alcatel사 제품(1901)으로서 fiber-to-fiber 이득이 소신호 이득이 25 dB이고 BRS(Buried Ridge Stripe) 형태의 구조로 되어 있다. 클럭광과 신호광과의 주파수 차이는 5 nm(=625 GHz)로서 시상수가 수백 펨토 초내지 수십 펨토 초인 비선형 이득변조 현상인 carrier heating(반응 시상수 = 650 fs)나 spectral hole burning(반응 시상수 = 50 fs)에 의해 4광파 혼합신호의 최대 반응 속도가 결정된다. 그러나, 실제 광펄스폭이 10 ps 정도이므로 본 PLL 시스템의 최대 반응속도는 100 GHz 정도로 예

상된다 따라서 반도체 광 증폭기에서 발생된 4광파 혼합신호만을 분리하기 위해 1.2 nm의 밴드폭을 갖는 광필터를 사용하여 -39 dBm 출력의 4광파 혼합 신호를 추출한후 이를 다시 EDFA로 증폭하고 다시 1.2 nm 밴드폭의 광필터를 이용하여 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 성분을 제거한 후, 125 MHz 밴드폭을 갖는 저속 InGaAs/PIN 광검출기(New focus, 1811)와 전기적 밴드 패스 필터(EBPF)를 사용하여 4 Δf (=400 KHz) 성분의 정현파 성분만 추출하였다. 이 주파수 성분을 옙셋 성분, Δf =100 KHz)와 비교하기 위해 다시 전기적으로 4분배하고 TTL 논리 소자를 이용하여 100 KHz의 구형파로 만들었다. 한편, (10 G+100 K)Hz로 변조된 클럭광 펄스의 주파수 성분과 초기 10 GHz로 임의 초기화된 VCO의 주파수와의 RF 혼합기(Miteq, DM0812LW2)에서 발생하는 저 주파수 성분인 Δf 를 추출하고 이를 다시 구형파로 만들어 위상 비교기로 보내 신호광-클럭광 상호 연관 신호와 클럭 펄스-VCO 상호 연관 신호의 위상을 비교하였다. 이때, 위상비교기의 출력은 입력 구형파의 위상차이에 비례하는 duty 비율의 구형파를 내보내는데, loop 필터회로를 제작하여 이러한 duty 비율에 비례하는 DC 성분의 전압신호를 만들어서 이를 VCO 진동자(Magnum Microwave, MDR3001-02)에 걸어주면 입력 신호광의 위상변화에 따라 VCO의 중심 주파수가 궤환 루프를 돌면서 변화한다

III. 실험 결과 및 토의

그림 4는 유리 고차조화 모드 록킹된 광섬유 레이저의 출력 펄스열의 RF 스펙트럼을 나타낸 것으로서 20 GHz 성분이 10 GHz 성분에 비해 약 17 dB 정도 우세한 것을 보여준다. 이러한 10 GHz의 성분은 10GHz의 변조기를 이용하여 유리-고차 조화 모드 록킹을 하였으므로 완전한 10 GHz의 성분 제거가 잘 이루어지지 않았음을 나타내주고 있다.

그림 5는 반도체 광 증폭기에서 발생된 4광파 혼합 성분의 저주파대역 스펙트럼을 나타낸 것으로서 400 KHz(=4 Δf)과 2 차 고조파 성분인 800 KHz(=8 Δf)의 피크를 보여주고 있다.

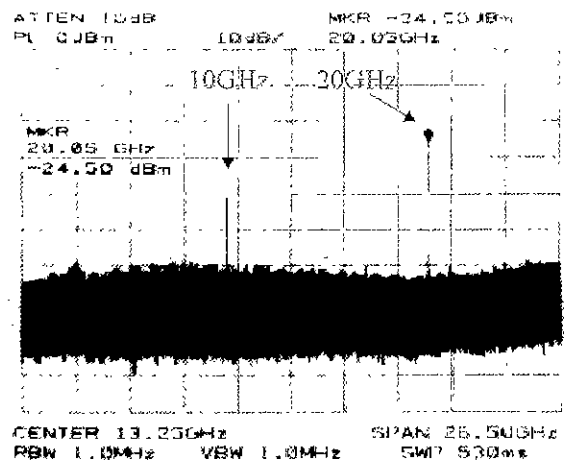


그림 4. RF spectrum of 20 Gbit/s rational harmonic mode-locked fiber laser.

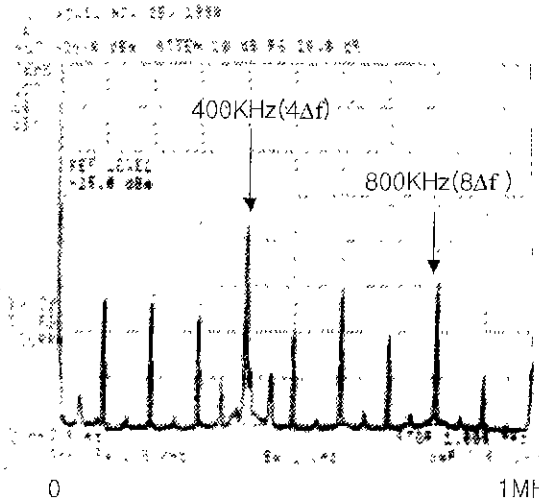


그림 5. RF power spectrum (100 KHz/div.) of the cross correlation between 40 Gbit/s signals and 10 Gbit/s clock pulses in FWM-PLL system.

그림에서 보면, 신호광원에서 발생된 10GHz 성분에 해당하는 4광파 혼합성분(= 4f)의 하모닉 성분들도 섞여있음을 보여주고 있다.

그림 6(a)은 위상 동기된 VCO의 RF 스펙트럼을 나타내는

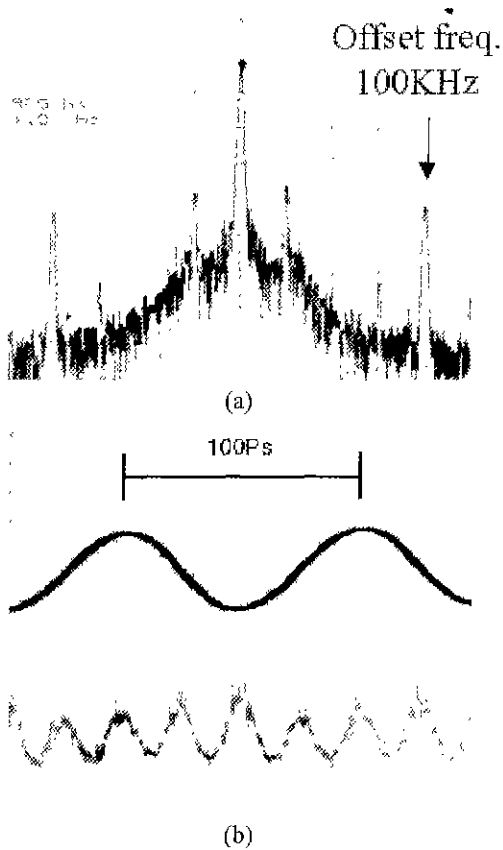


그림 6. (a) RF spectrum (25 KHz/div.) of 10 GHz VCO output and (b) oscilloscope waveforms of synchronized 10 GHz VCO output in the phase-locked regime (upper) and 40 Gbit/s optical signal pulse (lower).

것으로서 중심주파수는 10 GHz이고 화살표로 읊셋 주파수 성분인 100 KHz 성분도 나타내고 있음을 보여주나 중심주파수 성분과는 약 40 dB 정도로 차이가 크다. 또한 25 KHz의 미약한 성분도 나타나고 있는데 이것은 수십 KHz 대역에 존재하는 팽팽유 레이저의 relaxation oscillation 성분에 기인한다.^[11] 전체적으로 신호대 잡음비(SNR)는 약 35 dB 정도로서 중심주파수 성분주위에 약 50 KHz 정도의 범위에 걸쳐서 스펙트럼 발(spectral pedestal)이 존재하는 것으로 보아 진폭 노이즈 및 시간 지터가 존재함을 나타내고 있으며, 10 GHz의 고차 성분들의 RF 주파수 스펙트럼의 잡음출력 대 신호 출력비($\sigma_n = \sqrt{\frac{P_n}{P_s}}$, $\sigma_t = \frac{T}{2\pi n} \sigma_A$; σ_A : amplitude jitter, σ_t : Time jitter, P_n : noise power, P_s : signal power, n : harmonic number, T : period)에서 구할 수 있는데, 그림 6(a)의 10 GHz VCO 스펙트럼 파형에서 신호 파워와 노이즈 파워값으로부터 환산하면 약 0.51 ps(amplitude jitter: 3.2%) 정도로 측정된다.^[13] 이 값은 기준이 될만한 jitter-free의 synthesizer의 오실로스코프에 나타난 신호와 그림 6(b)의 위상동기된 VCO의 파형과 비교할 때 유사한 수치이다. 또 그림 6(b)에서 40 Gbit/s급의 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

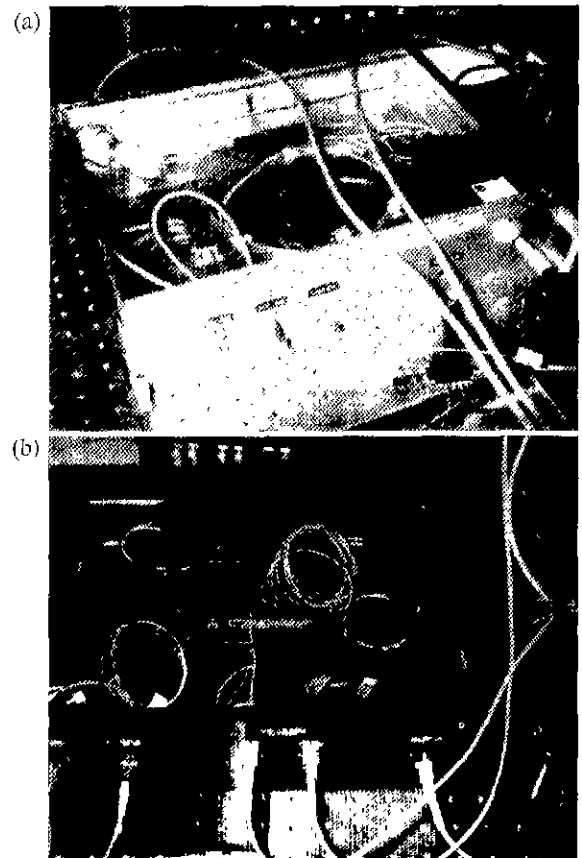


그림 7. Photographic view of (a) 20 Gbps rational-harmonically mode-locked erbium-doped fiber ring laser (ML-EDFL) and (b) 40 GHz optical phase lock loop module.

방법¹¹⁾으로 입력 신호광의 위상 변화를 유도하기 위해 입력 광 펄스열의 주파수를 변화시키므로서 VCO의 진동자 파형의 변화를 관측하여 위상동기 주파수 범위는 약 10 KHz로 측정되었으며, Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 위상 동기된 상태에서 5시간 이상 안정되게 동작됨을 관측하였다. 따라서, 본 시스템에서 허용되는 입력 주파수의 변화 범위는 10 KHz이며, 이는 클럭 레이저로 사용된 광섬유 레이저의 lock-in 주파수 범위인 200 KHz 이내에 드는 범위이다.

그림 7은 40 GHz PLL 회로에 사용된 10 Gbit/s급 고차 조화 모드 록킹된 광섬유 레이저와 클럭 펄스 레이저 부분을 제외한 PLL 시스템 모듈에 대한 사진이다.

IV. 결 론

40 Gbit/s 광신호 펄스열로부터 반도체 광 증폭기에서 발생된 4광파 혼합신호를 이용하여 이에 위상 동기된 10 GHz의 VCO 진동자 신호를 추출하였다. 외부 입력 신호광의 펄스 레이트를 임의로 변화시켜서 VCO의 위상동기 주파수 범위를 측정 한 결과 약 10 KHz로 측정되었다. 본 연구 결과인 40 GHz 위상동기 회로는 OTDM 전송시스템에서 역다중화 부분에 제어신호로서 이용될 것이며 광통신분야뿐만 아니라 초고속 신

호처리에 유용한 시간 동기화 모듈로서 활용될 것이다.

참고문헌

- [1] S. Kawanishi *et al.*, OFC'99, PD1 (1999).
- [2] S. Kawanishi *et al.*, Electron. Lett. **31**, 816 (1995).
- [3] S. Kawanishi *et al.*, Electron. Lett. **32**, 916 (1996).
- [4] M. Nakazawa, OFC'99, F11-1 (1999)
- [5] M. Jinno and T. Matsumoto, IEEE J. Quantum Electron. **28**, 895 (1992).
- [6] R. Ludwig *et al.*, Electron. Lett. **32**, 327 (1996).
- [7] O. Kamatani, S. Kawanishi, and M. Saruwatari, Electron. Lett. **30**, 807 (1994).
- [8] S. Kawanishi, J. Lightwave Technol. **11**, 2123 (1993).
- [9] O. Kamatani and S. Kawanishi, J. Lightwave Technol. **14**, 1757 (1996).
- [10] S. Kawanishi, IEEE J. Quantum Electron. **34**, 2064 (1998).
- [11] Dong Hwan Kim, Sang Hyuck Kim, Jae Cheol Jo, and Sang Sam Choi, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 6766 (1999).
- [12] Min-Yong Jeon *et al.*, J. Opt. Soc. Korea, **2**, 9 (1998).
- [13] U. Keller *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. **25**, 280 (1989).
- [14] 김동환, 김상혁, 조제철, 최상삼, 한국광학회지 **10**, 507 (1999).

40 GHz optical phase lock loop circuit for ultrahigh speed optical time division demultiplexing system

Dong Hwan Kim¹, Sang Hyuck Kim, Jae Cheol Jo, and Sang Sam Choi

Photonics Research Center, KIST, Seoul 130-650, KOREA

¹E-mail: dhwan@kist.re.kr

(Received June 21, 2000, Revised manuscript received August 25, 2000)

A new phase lock loop (PLL) is proposed and demonstrated for clock recovery from 40 Gbit/s time-division-multiplexed (TDM) optical pulse train. The proposed clock recovery scheme improves the jitter effect coming from the clock pulse laser of harmonically-mode locked fiber laser. The cross-correlation frequency component between the optical signal and an optical clock pulse train is detected as a four-wave-mixing (FWM) signal generated in SOA. The lock-in frequency range of the clock recovery is found to be within 10 KHz.

OCIS codes : 060.2330, 060.4510, 190.4380, 320.7110, 320.7130.