

논문 01-02-13

초고속 OTDM/WDM을 위한 파장 및 반복율 가변 광 펄스 발생

Wavelength and Repetition-Rate Tunable Optical Pulse Generation for Ultrafast OTDM/WDM

崔景宣*, 韓鍾珉*, 徐東善*, 全榮民**, 李錫**

(Kyoung-Sun Choi*, Chong-Min Han*, Dong-Sun Seo*, Young-Min Jhon**, Seok Lee**)

요약

광 시분할 및 파장분할 다중화에 의한 초고속 광통신 시스템에 적합한 파장 및 반복율 가변 능력을 갖는 초단 펄스열을 고리형 반도체 광섬유 레이저의 광주입 모드잠김에 의해 발생시켰다. 발생된 광 펄스열은 10 GHz, 20 GHz, 30 GHz, 및 40 GHz의 다양한 반복율에서 ~10 피코초 정도의 펄스폭과 30 nm가 넘는 파장 가변능력을 보였다.

Abstract

Wavelength and repetition-rate tunable optical pulse-trains for ultrafast optical time- and wavelength division multiplexing are generated from a semiconductor fiber ring laser by optical injection mode-locking. The pulse trains show the pulse with of ~10 ps and the wavelength tuning of wider than 30 nm at various repetition-rates of 10 GHz, 20 GHz, 30 GHz and 40 GHz, respectively.

Key words : Optical Pulse, Wavelength and Repetition-Rate Tunable Source, OTDM, WDM

1. 서론

최근 정보통신산업의 급격한 발달로 대용량의 멀티미디어 정보를 초고속으로 전달해야 할 필요성으로 인해, 초고속 통신망 구현을 위한 기초기술개발이 절실히 요구되고 있다. 미래의 Tbps급 초고속 및 대용량 광통신망은 단일 채널 10 Gbps의 수 100개의 고품

도 파장분할다중화(DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) 방식보다는 단일채널의 정보전송속도가 100 Gbps급에 이르는 광시분할다중화(OTDM: Optical Time Division Multiplexing) 방식을 근간으로 하는 몇 개의 저밀도 WDM(CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing) 채널로 구현될 전망이다.[1] 즉, 채널수가 100 여개에 이르는 DWDM 방

* 明知大學校 電子工學科

(Dep. of Elec. Eng., Myongji Univ.)

** 韓國科學技術研究員 光技術研究센터

接受日: 2001年 8月29日, 修正完了日: 2001年11月 6日

(Photonic Research Center, Korea Institute of Science and Technology)

※ 본 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음

식은 채널간의 보호대역 설정으로 인한 광증폭기 및 광섬유의 가용 대역폭 이용율을 현저히 감소시킬 뿐만 아니라, 기준파장 광원 구현 및 WDM 역다중화기 구현의 복잡성으로 인해, Tbps급 시스템 구현 방식으로는 적절치 않다. 반면, 비트 수용 능력이 보다 뛰어난 펄스 변조에 근거한 고속 OTDM 시스템은 전송대역폭의 활용도가 높을 뿐만 아니라 다중화된 선로의 감시가 용이한 장점이 있어서, 미래의 초고속 정보전송시스템은 OTDM과 WDM의 장점을 취한 OTDM/WDM망으로 구현하는 것이 바람직하다. 이 같은 미래의 초고속 OTDM/WDM 전송을 근본적으로 가능하게 하는 핵심기술이 파장 및 반복율 가변 능력을 갖는 고속의 초단 광 펄스열 발생기술이다. 즉, OTDM에 의해 정보전송속도를 증진시키기 위해서는 전기적 시분할다중화(ETDM: Electrical TDM)이 가능한 10 ~ 40 GHz의 속도 제어가 가능한 안정된 초단 펄스 발생기술과 이 펄스원의 파장가변 능력이 요구된다.

레이저에서 초단 펄스를 발생시키는 방식으로는 수동형 모드잠김과 능동형 모드잠김이 있다. 수동형 모드잠김 방법은 짧은 펄스폭을 갖는 펄스를 발생시킬 수 있지만, 시간지터(timing jitter)가 크고 펄스 발생속도 조절이 어려우며, 펄스발생속도가 공진기 길이에 의해 결정되는 단점이 있다. 반면 능동형 모드잠김은 상대적으로 펄스폭은 넓지만, 매우 안정된 출력과 공진기가 긴 광섬유 레이저에서도 높은 반복율을 가진 펄스열 발생이 가능한 장점이 있다. 전송선로인 광섬유와의 높은 결합성으로 인해 많은 연구관심이 되어온 광섬유 레이저는 정상파가 생기지 않는 고리형을 많이 이용하는데, 공진기 길이는 ~10 m로서 10 GHz급의 반복율을 가진 펄스를 발생시키기 위해서는 능동형 모드잠김 방법이 주로 이용된다. 고리형 광섬유 레이저의 능동형 모드잠김에서 10 GHz 이상의 발생속도는 통상의 전자소자로 제어하기에는 비용부담이 너무 커서, 비교적 낮은 주파수의 전자소자로 속도를 제어할 수 있는 광 펄스열 반복율 배수화 [2]-[4], 고차 모드잠김 광섬유 레이저[5], 등이 제시된 바 있다.

고리형 광섬유 레이저는 이득 매질에 따라, 어븀 첨가 광섬유 레이저 (EDFRL : Erbium-Doped Fiber Ring Laser)와 반도체 광섬유 레이저(SFRL: Semiconductor Fiber Ring Laser)로 나눌 수 있다. 전자 공진기 자체가 이득 매질인 EDF로 이루어져 있어서, 큰 이득을 얻을 수 있는 반면, 대역폭이 좁아서

출력의 파장가변 영역이 상대적으로 좁다는 단점이 있다. 펄스 동작을 위한 EDFRL의 능동모드 잠김은 통상 공진기 내에 광변조기를 삽입하여 구현한다. 반도체 SOA의 특성을 이용하는 후자는[6] CW 레이저 출력이나 모드잠김보다는 SOA의 파장가변 특성을 이용한 파장변환기로 많이 이용되어 왔다. SFRL을 이용한 파장변환기는 변조 형태와 무관하게 100 Gbps 이상의 초고속 파장변환이 가능하며, 8 THz($\Delta\lambda = 64 \text{ nm @ } 1550 \text{ nm}$) 이상의 SOA 이득 스펙트럼 대역 전체에서 파장 변환이 가능하며, 낮은 세기의 입력에서도 파장 변환이 가능하다는 장점이 있다.[7]-[9] SFRL의 능동모드잠김은 통상 SOA에 인가되는 전류 변조에 의해 구현되는데, 이 경우 파장변환기의 장점에서 보인 SOA 이득 스펙트럼 대역 전체에서 파장 가변이 가능한 장점은 있으나, 주입전류에 의한 SOA 이득변조 속도는 너무 느려서 상대적으로 짧은 펄스를 발생시키거나 고조파 변조가 거의 불가능한 단점이 있다. 본 논문에서는 이 같은 단점을 극복하고 SFRL을 이용한 파장변환기에서 나타난 SOA의 장점을 그대로 이용하기 위해, 외부 광주입에 의해 SOA의 이득변조를 수행하고자한다. 즉, SFRL에 SOA의 이득변조에 적합한 제어(control) 펄스를 주입시키고, 고리형 광섬유 레이저 내의 펄스 왕복시간(round-trip time)을 조절하여 다양한 반복율의 광 펄스열을 발생시키고, 공진기 내에 있는 파장가변필터를 이용하여 입의 파장의 능동모드잠김 펄스를 발생시키는 시스템을 구현한다. 실험을 통해 30 nm 이상의 파장가변능력을 갖는 ~10 피코초(ps)의 펄스를 입력펄스열의 고조파에 해당하는 10 GHz, 20 GHz, 30 GHz, 및 40 GHz까지 변환시킬 수 있음을 보이고자 한다. 우선, 2장에서는 기본적인 배경 이론을 논하고, 3장에서는 실험결과 및 고찰, 4장에서 결론을 맺는다.

II. SOA의 포화이득 변조에 의한 능동모드잠김

레이저 공진기로부터 초단 펄스를 얻는 방법으로서 능동 모드잠김 이론은 잘 알려져 있다. 즉, 단일 횡모드(transverse mode) 발진 레이저에 여러 개의 종모드(longitudinal mode)가 발진 할 때, 이들 종모드들의 위상을 정확히 일치하도록 정합시키면 출력은 각 모드들의 위상간섭에 의해 주기적으로 초단펄스를 발

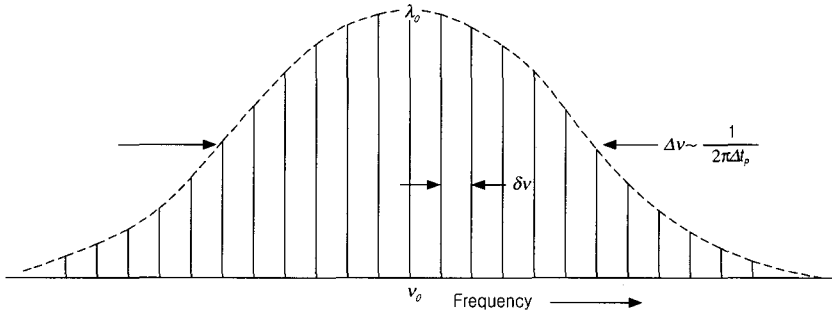


그림 1. 다중 종모드 발진을 보이는 레이저 스펙트럼

Fig. 1. Laser spectrum showing multiple longitudinal mode oscillation.

생시키는 특성을 보이게 된다. 이를 이론적으로 살펴 보면 다음과 같다.

그림 1에서 레이저 공진기내에서 여러개의 종모드가 발진하는 레이저의 스펙트럼을 보이는데, $\Delta\nu$ 는 전체 발진 선폭(bandwidth), ν_0 는 중심 모드의 주파수, 및 $\delta\nu$ 는 이웃 종모드간의 주파수 간격을 나타낸다. 공진기 길이를 L 이라고 하면 $\delta\nu$ 는 다음과 같다.

$$\delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

이 레이저의 출력 전기장은 각 모드들간의 합으로서 다음과 같이 주어진다.

$$e(t) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} E_n \exp [j2\pi(\nu_0 + n\delta\nu)t + \phi_n] \quad (2)$$

여기서, E_n 은 각 모드의 진폭, $N(= \Delta\nu/\nu)$ 은 모드의 수, 그리고 ϕ_n 은 각 모드의 위상으로서 일반적으로 해당 모드에 따라서 임의의 값을 갖는다. 만약 각모드의 진폭 $E_n = E_0$ 으로 일정하고, 모드 잠김되어 위상도 일정($\phi_n = 0$) 라고 할 때,

$$e(t) = E_0 e^{j\omega_0 t} \frac{\sin(N\omega_c t/2)}{\sin(\omega_c t/2)} \quad (3)$$

가 된다. 여기서 $\omega_c = 2\pi\delta\nu$ 이고, $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ 이다. 이 전기장에 의한 광 출력 세기 $I(t)$ 는 다음과 같다.

$$I(t) = \frac{e(t)e^*(t)}{2\eta_0} = \frac{E_0^2}{2\eta_0} \left[\frac{\sin(N\omega_c t/2)}{\sin(\omega_c t/2)} \right]^2 = I_0 \left[\frac{\sin(N\omega_c t/2)}{\sin(\omega_c t/2)} \right]^2 \quad (4)$$

여기서, η_0 는 공기 중의 고유 임피던스이고 I_0 는 단일 모드의 평균 세기이다.

즉, 식 (4)와 같은 모드잠김 된 레이저의 출력 특성은 다음과 같다.

1) 펄스간의 시간간격(τ_{RT})은 공진기의 왕복시간과 같다.

$$\tau_{RT} = \frac{2L}{c} = \frac{1}{\delta\nu} \quad (5)$$

2) 펄스의 침투 출력강도(I_p)는 평균레이저 출력($\langle I(t) \rangle$)의 N 배이다.

$$I_p = N \langle I(t) \rangle \quad (6)$$

3) 펄스 폭(Δt_p)은 발진 가능한 선폭의 역수에 비례한다.

$$\Delta t_p \approx \frac{1}{\Delta\nu} \quad (7)$$

이로부터 선폭이 넓을수록 높은 침투 출력세기와 짧은 펄스 폭을 얻을 수 있음을 알수 있으나, 모드수가 많을수록 모든 모드들을 잠김시키는 것이 어려워진다. 또한, 실제의 레이저에서는 그림 1에 보인바와 같이 레이저의 이득에 따라 전기장의 진폭(E_n)이 변하기 때문에 펄스의 출력이 식 (4)와는 약간의 차이가 있다. 이 전기장의 진폭을 가우시안 형태를 지닌다고 가정하면,

$$E_n = E_0 \exp \left[-2 \ln \left[2 \left(\frac{n\omega_c}{\Delta\omega} \right)^2 \right] \right] \quad (8)$$

$$\Delta t_p = \frac{4 \ln 2}{\Delta\omega} \quad (9)$$

가 되고, 이 때의 펄스의 출력은

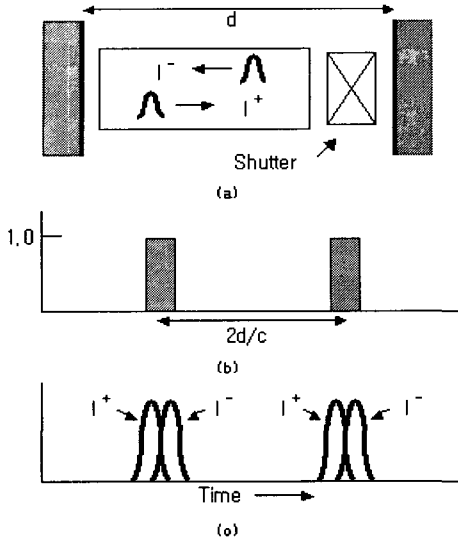


그림 78 일반적인 모드잠김 방법: (a) 레이저 공진기, (b) 셔터 통과율, (c) 셔터 상에서의 빛의 강도

Fig. 2. Typical method of mode locking: (a) laser cavity, (b) transmission of shutter, and (c) light intensities at shutter.

$$I(t) = \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_c} \right) \langle I(t) \rangle \times \exp \left[-4 \ln \left[2 \left(\frac{t}{\Delta t_i} \right)^2 \right] \right] \quad (10)$$

가 된다.[10] 다소의 펄스 형태 차에도 불구하고 모드잠김 레이저의 특성인 식 (5) ~ (7)은 계속 유효함을 알 수 있다.

이 같은 모드잠김을 위한 각 발진 모드간의 위상 정합은 그림 2에 보인 바와 같이 레이저 공진기 내에 빛의 통과를 제어할 수 있는 셔터(shutter)를 놓고, 이 셔터를 진행 및 후진하는 두 빛의 위치가 통과하는 순간마다 열어서 빛을 통과시키고 그 이외 시간에는 닫아서 빛이 통과하지 못하도록하므로 쉽게 구현할 수 있다. 그림 2에서 보인 바와 같이 모드잠김을 위한 빛의 통과 주기는 공진기 왕복시간과 일치하게 된다. 이 주기를 정수로 나눈 빠른 속도로 셔터를 개폐하면 보다 고속의 펄스를 얻을 수 있는 고조파(harmonic) 모드잠김이 가능해진다. 일반적으로 이러한 셔터의 역할은 포화흡수기(saturable absorber)나 공진기 내에 위치한 스위치 또는 광변조기를 이용하여

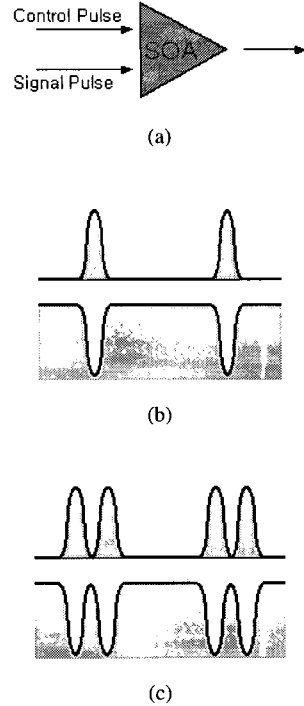


그림 3. 제어 펄스(상)에 의한 SOA의 신호이득 변조(하): (a) 변조 구조, (b) 단일 펄스 변조, (c) 2중 펄스 변조

Fig. 3. SOA gain modulation by control pulses; (a) configuration, (b) signal pulse modulation, and (c) double pulse modulation.

구현한다. 그러나, SOA를 기반으로하는 SFRL의 능동 모드잠김에서는 별도의 광변조기를 삽입하기보다는 통상 SOA가 신호증폭과 동시에 이 셔터의 역할을 수행한다. 종래의 방법은 SOA에 인가되는 전류를 변조하므로써, SOA의 이득을 조절하여 이 같은 셔터 역할을 구현하였다. 그러나, SOA의 이득은 주입된 전류에 의해 펌핑(pumping)된 전자의 밀도에 비례하므로, 주입전류 자체의 형태보다는 주입된 전류의 누적(integral)에 비례하여, 고속 스위칭이 불가능하다. 이에 본 논문에서는 SOA에 초단 펄스를 인가하여 SOA의 이득포화에 의한 교차이득변조(cross-gain modulation)에 의해 SOA가 셔터로서의 역할을 수행토록 하고자한다.

그림 3은 SOA에서 입력되는 제어펄스에 의한

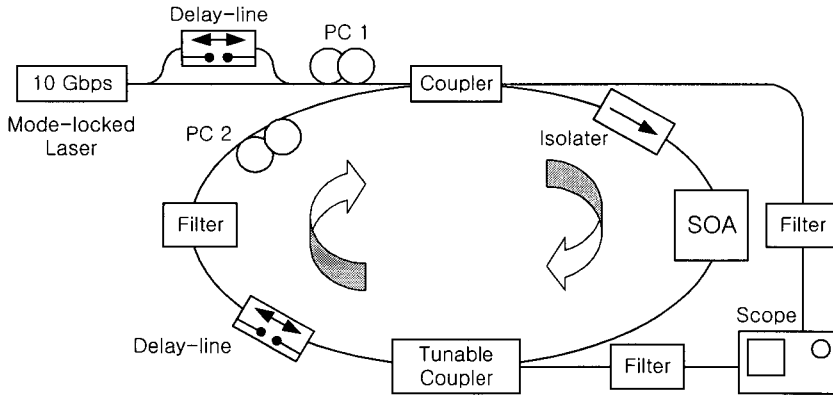


그림 4. 파장 및 반복율 가변 광 펄스 발생 실험 구성도

Fig. 4. Experimental setup of the wavelength and repetition-rate tunable optical pulse generation

SOA의 신호이득변조 특성을 보여준다. 그림 3(b)에서 우리는 단일 펄스를 주기적으로 주입할 경우 SOA의 이득포화에 의한 교차이득변조특성에 의해 SOA 서터는 통상의 서터와는 정반대로 동작함을 알 수 있다. 즉, 대부분의 시간은 신호 펄스를 통과시키고 특정시간 만을 불통과 시킨다. 만약, 그림 3(c)에 보인 바와 같이 인접한 2개의 신호펄스를 주기적으로 SOA에 주입하면, SOA는 2개의 펄스 사이에서 정상적인 서터 역할을 수행하게 된다. 즉, 그림 3(c)의 펄스로 SOA의 이득을 변조할 경우 훨씬 용이한 능동 모드잠김이 구

현될 수 있음을 보인다. 그러므로, 실험에서는 2개의 인접한 펄스로 구성된 2중 펄스열에 대해 SFRL의 능동모드잠김을 조사하고, 여러 동작 파라미터에 대한 출력특성을 분석하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 사용된 실험장치 구성도는 그림 4에

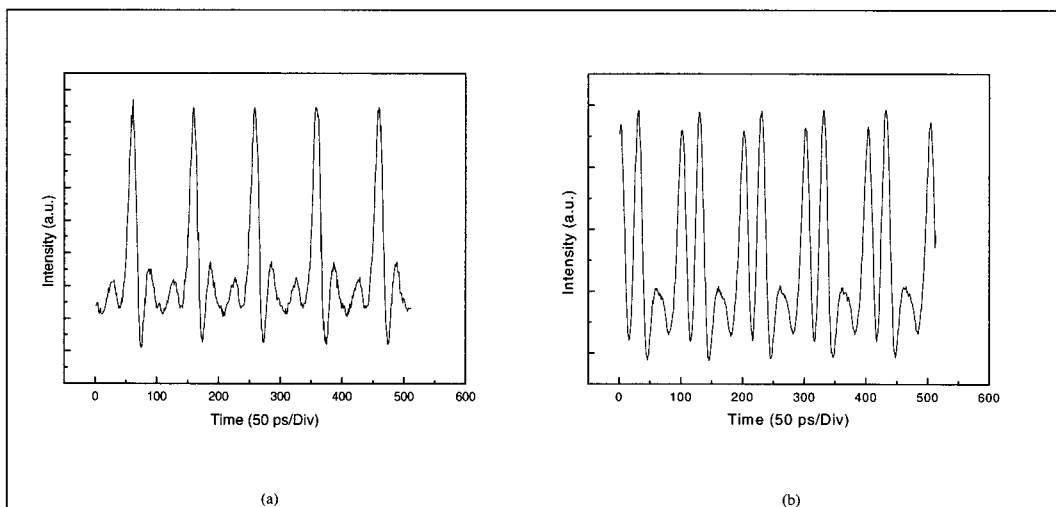


그림 5. ML-EDFL의 (a) 출력 신호와 (b) 2중 펄스 제어신호

Fig. 5. ML-EDFL output (a) and double pulse train for the control (b).

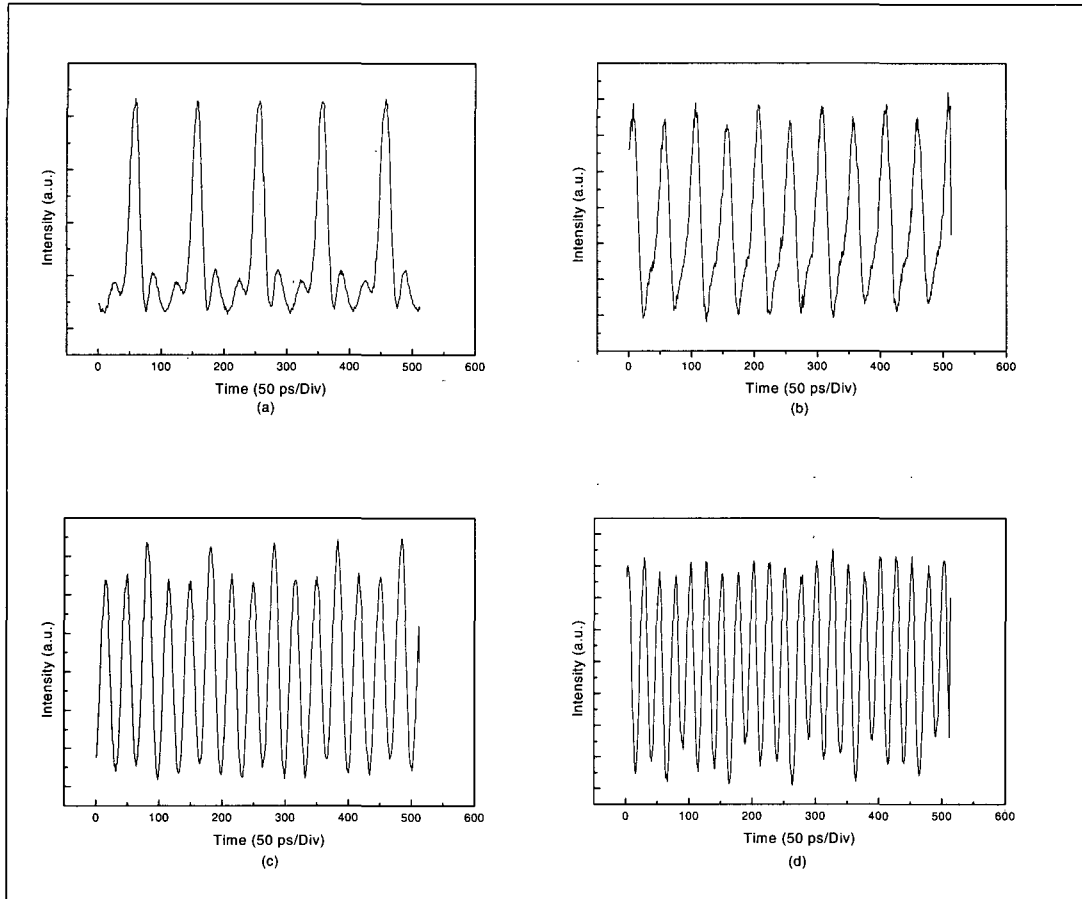


그림 6. 출력 신호 펄스열; (a)10 GHz, (b)20 GHz, (c)30 GHz, (d)40 GHz

Fig. 6. Output pulse trains; (a)10 GHz, (b)20 GHz, (c)30 GHz, and (d)40 GHz

보인 바와 같다. 이 시스템의 구성소자는 광섬유 가변 커플러(tunable coupler), 편광 조절기, SOA(1550 nm), 광 순환기, 3-dB 광섬유 커플러, 그리고 펄스 왕복시간 조절을 위한 광 지연선이다. 각 구성 소자는 단일 모드 광섬유 커넥터로 연결되어 있어서 각 구성 소자의 위치를 쉽게 바꿀 수 있도록 하였다. 가는 선 폭 조정과 최대의 효율을 얻기 위해 SFRL 공진기내에 편광 조절기(PC: Polarization Controller)를 설치하였다. SFRL에서의 출력전력 손실 또한 무시할 수 없기 때문에 비울 가변 커플러로 적절한 보상(2:8)을 하여 주었고, 광 순환기로 방향성을 주어 정상과 잡음이 생기는 것을 방지하였다. 사용한 SOA는 길이가 1 mm, 반송자 수명이 2 ns 정도이고 양면에 반사율이 10^{-3} - 10^{-4} 정도가 되도록 무반사 박막증착되었으며,

200 mA의 최대 펌핑 전류에서 약 23 dB의 광섬유 끝단(fiber-to-fiber) 이득과 7.5 dBm 정도의 포화 출력 파워를 가지고 있다. 앞서 설명한 바와 같이, 본 논문에서 제시한 구조에서는 SOA가 고리형 광섬유 레이저 내에서 EDF를 대신한 이득 매질로서 작용할 뿐만 아니라, 입력 신호에 의해 이득이 변조되는 샤프터로서의 역할을 동시에 하고 있어 기존의 방식들에 비해 그 구조가 간단해진다. 구성된 레이저의 공진기의 길이(ring cavity)는 총 17.8 m 였다.

입력 신호 광원으로는 능동형 모드잠김된 어븀 도핑 광섬유 레이저(ML-EDFL: Mode-locked Er-doped Fiber Laser)를 사용하였다. 이 레이저는 광 강도 변조기를 이용하여 능동적으로 10 GHz로 고조파 모드잠김되어 그림 5(a)에 보인바와 같이 10.2 피코초의 펄

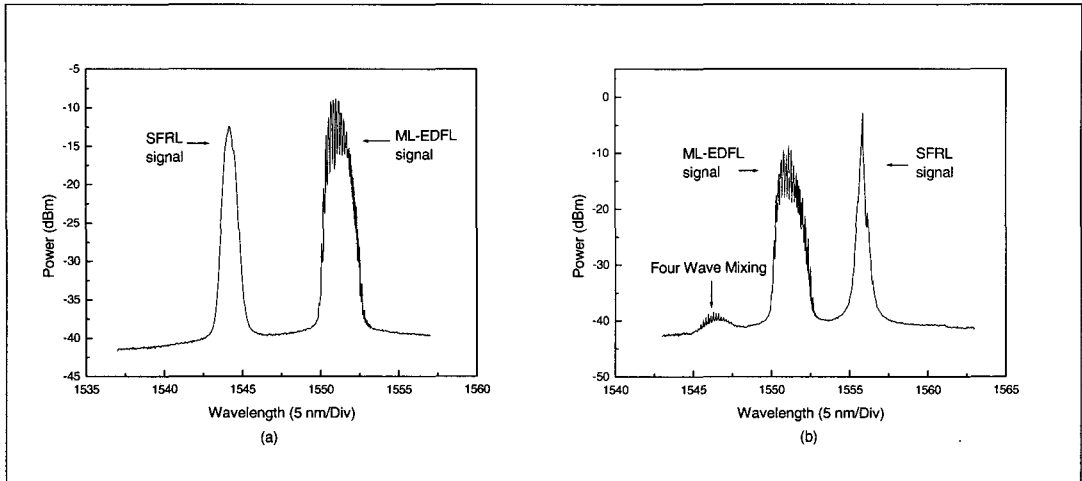


그림 7. ML-EDFL 제어신호와 파장가변된 SFRL 출력신호의 스펙트럼; (a) 단파장, (b) 장파장
 Fig. 7. Spectra of the ML-EDFL control signal and wavelength tuned SFRL output; (a) short-wavelength and (b) long-wavelength

스 폭, 1.2 mW의 평균 전력과 0.42 nm의 선폭을 가진 출력특성을 보였다.[11] 이 10 GHz ML-EDFL 출력을 3-dB 광섬유 커플러로 분리한 후에 한 팔(arm)에 광 지연선을 삽입하여 ~25 피코초 떨어진 2개의 인접한 펄스열을 구현하였으며, 펄스간 간격은 대략 ~14 피코초 정도가 되었다. 그림 5는 능동형 ML-EDFL을 이용하여 얻은 1500 nm대 파장의 10 GHz의 단일 펄스 출력과 광섬유 지연선을 이용하여 입력 제어 광원으로 구현한 2중 펄스 모양을 보인다. 2개의 입력 펄스열을 SFRL에 주입하여, 성공적인 기본파 및 고조파 능동모드잠김을 이룩할 수 있었다.

즉, 광 지연선의 시간지연을 조절하여 공진기의 길이를 조절하므로써, 그림 6에 보인 바와 같이 모드잠김 출력펄스의 속도를 10 GHz 간격으로 10~40 GHz의 초단 펄스열을 얻을 수 있었다. 이때, SOA의 펌핑 전류를 165 mA로 고정하고, 평균 전력 -6.86 dBm인 제어 펄스를 인가하였으며, 출력 평균 전력과 펄스폭은 펄스발생속도와 거의 무관하게 -11.47 dBm과 12 피코초로 나타났다.

다음으로, 고리형 광섬유 레이저 내에 위치한 1.2 nm 투과대역폭의 파장가변 필터의 통과대역을 조절하여 능동모드잠김 출력 펄스열의 파장을 가변하였다. 그림 7은 이 파장가변 필터로 신호 통과대역을 가변하여 얻은 조절 펄스 및 출력 펄스의 스펙트럼인데, 입력 제어신호는 1551nm에 고정되어 있으며, 출

력은 1.2nm의 대역폭을 갖고 1530~1560 nm 사이의 30nm 영역에서 파장가변되고 있음을 보인다. 그림 7 (b)와 같이 필터통과대역을 입력 펄스신호 파장대보다 긴 파장에 설정한 경우에는 SFRL이 단일모드 광섬유로 구성되어 있어서 4광파 혼합 신호가 발생하여 출력 전력에 약간의 손실이 있음을 볼 수 있다. 이는 편광유지 광섬유로 충분히 보상할 수 있을 것으로 예측된다.[12]

이제, 본 논문에서 제시한 구조의 동작조건에 따른 출력 특성을 알아보기 위해 주입되는 제어 펄스의 전력과 SOA의 주입 전류를 가변하면서 출력 펄스열의 파형을 조사한다. 우선, SOA의 주입 전류를 165 mA로 고정하고, 제어 펄스 전력을 4.8 mW ~ 9.12 mW까지 변환 시켰지만, 출력에 큰 변화를 주지 않고 조금씩 증가함을 볼 수 있었다. 이는 공진기 내의 셔터가 어느 정도 정상적으로 동작하는 한, 출력펄스는 모드잠김을 위한 셔터의 통과율에 약간의 변화를 주는 제어 펄스의 전력보다는 SOA의 이득에 의해 좌우되는 지극히 당연한 현상으로 판단된다. SOA의 펌핑 전류에 대한 출력 특성을 조사하기 위해 입력 제어 펄스전력을 6.24 mW로 고정시키고, SOA 주입전류를 120 ~ 170 mA까지 10 mA 간격으로 변환시켰다. 이 때, 레이저 발진을 위한 SOA의 문턱 전류값은 펄스 발생속도에 거의 무관하게 120 mA로 나타났다. 그림 8은 10 mA 간격의 SOA 주입전류 변화에 따른

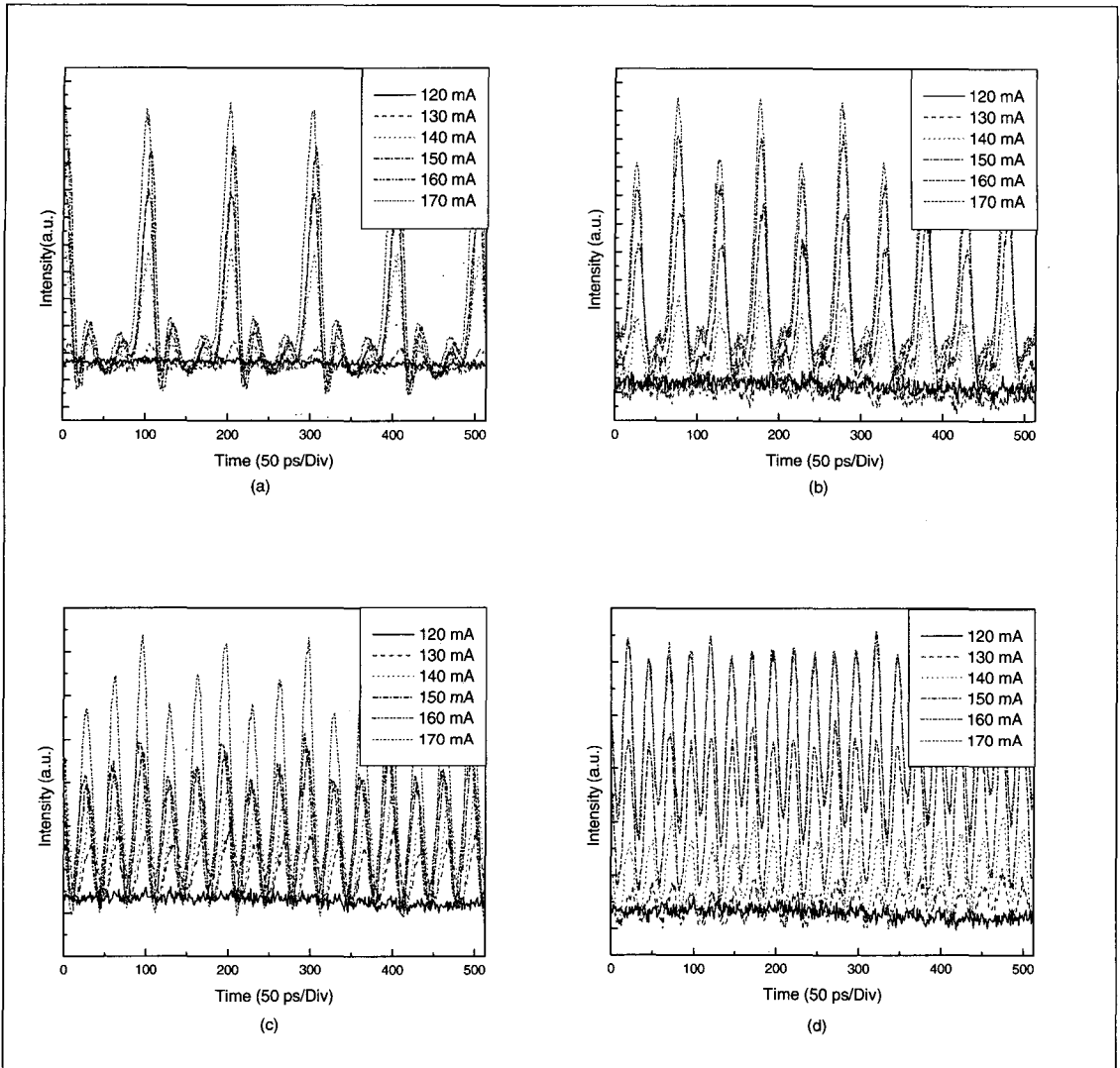


그림 8. 입력 제어 펄스 전력 6.24 mW에서 SOA 주입 전류를 120 mA에서 170 mA 까지 의 변화시켰을 때의 출력 펄스 특성; (a) 10 GHz, (b) 20 GHz, (c) 30 GHz, (d) 40 GHz

Fig. 8. Output pulses when the SOA injection current was changed from 120 mA to 170 mA, under the fixed control pulse power at 6.24 mW; (a) 10 GHz, (b) 20 GHz, (c) 30 GHz, and (d) 40 GHz

10 ~ 40 GHz 출력 펄스열을 겹쳐서 그린 것이다. 주입전류 120 ~ 150 mA에서는 주입전류가 증가함에 따라 펄스 증폭도가 거의 선형적으로 증가하나, 주입 전류가 170 mA 이상으로 증가하면 온도증가 등의 악영향으로 펄스 증폭도가 감소하여 펄스 크기는 포화 되는 것으로 나타났다. 즉, SOA의 적절한 주입 전류 값은 대략 165 mA 정도임을 확인하였다.

이 같은 SOA 주입전류에 따른 출력 변화 의존성은 SFRL을 안정된 반복을 가변 광 클럭 추출 시스템으로 동작시키기 위해서는 SOA 주입 전류를 일정한 값으로 유지시켜야 함을 의미한다.

IV. 결 론

차세대 초고속 OTDM/WDM 광통신망에 적합한 파장 및 반복율 가변 초단 펄스원을 구현하기 위해, 반도체 광증폭기(SOA)를 기반으로하여 파장가변능력이 있는 반도체 광섬유 레이저를 능동형 모드잠김시켰다. 반복율 가변을 위한 고조파 모드잠김은 SOA를 직접변조하는 대신에 외부 제어광을 주입하여 SOA를 교차이득변조하여 구현했는데, 제어광으로는 10 피코초의 2개 펄스가 25 피코초 간격으로 이웃하는 2개 펄스조합을 10 GHz로 발생시켜 사용하였다. 제안된 고리형 반도체 광섬유 레이저 구조에서 SOA는 레이저 내의 이득 매질로서 작용할 뿐만 아니라, 제어 신호에 의해 변조되는 서터 소자의 역할을 함으로서, SOA 이득 스펙트럼 내에서의 넓은 파장가변과 반복율 가변이 가능한 12 피코초 정도의 펄스폭을 보이는 고조파 모드잠김이 가능함을 확인하였다. 즉, 고리형 반도체 광섬유 레이저 내에 삽입된 파장 가변 필터를 조절하여 30 nm 이상의 파장 가변이 가능함을 보였으며, 공진기의 길이를 조절하여 출력의 반복율이 10 GHz, 20 GHz, 30 GHz, 및 40 GHz에 이르기까지 고조파 모드잠김이 가능함을 입증하였다. 또한, 입력 제어광의 전력과 SOA 주입전류에 대한 함수로서, 10 GHz 간격의 10 GHz ~ 40 GHz 각 펄스열에 대해 출력특성을 조사하였다. 그 결과, 출력은 입력 제어펄스의 전력에는 덜 민감한 특성을 보였으며, SOA 주입전류에 대해서는 ~120 mA에서 발진을 시작하여 SOA 전류 증가할수록 출력 전력도 증가하다가 ~170 mA에서 포화되는 것으로 나타남으로서, 최적 전류값은 165 mA 임을 확인하였다. 끝으로, SOA는 EDF와는 달리 실온에서 동시에 여러 파장의 발진이 가능하므로, 이 시스템에 광섬유 격자나 웨브리 패킷 에탈론 등의 다파장 선택소자를 사용하면 다파장 펄스열도 안정적으로 발생시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] B. E. Olsson, L. Rau, and D. J. Blumenthal, "WDM to OTDM Multiplexing Using an Ultrafast All-Optical Wavelength Converter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 9, pp. 1005-1007, Sept. 2001.
- [2] K. S. Abedin, N. Onodera, and M. Hyodo, "Repetition-rate multiplication in actively mode-locked fibre lasers by higher-order FM mode locking using a high-finesse Fabry-Perot filter," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 10, pp. 1311-1313, Sept. 1998.
- [3] T. Papakyriakopoulos, K. Vlachos, A. Hatziefremidis, and H. Avramopoulos, "Optical clock repetition-rate multiplier for high-speed digital optical logic circuits," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 11, pp. 717-719, June 1999.
- [4] S. Arahira, S. Kutsuzawa, Y. Matsui, D. Kunimatsu, and Y. Ogawa, "Generation of synchronized subterahertz optical pulsetrains by repetition-frequency multiplication of a subharmonic synchronous mode-locked semiconductor laser diode using fiber dispersion," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 2, pp. 209-211, Feb. 1998.
- [5] C. Wu, and N. K. Dutta, "High-repetition-rate optical pulse generation using a rational harmonic mode-locked fiber laser," *IEEE Quantum. Electron.*, vol. 36, no. 2, pp. 145-150, Feb. 2000.
- [6] Z. G. Lu, S. A. Boothroyd, J. Chrostowski, "Tunable Wavelength Conversion in a Semiconductor-Fiber Ring Laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 7, pp. 806-808, July 1999.
- [7] J. Chow, G. Town, B. Eggleton, M. Ibsen, K. Sugden, and I. Bennion, "Multiwavelength Generation in an Erbium-Doped Fiber Laser using In-Fiber Comb Filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 60-62, Jan. 1996.
- [8] D. Zhou, P. R. Prucnal, and I. Glesk, "A Widely Tunable Narrow Linewidth Semiconductor Fiber Ring Laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 781-783, June 1998.
- [9] A. D'Ottavi, P. Spano, G. Hunziker, R. Paiella, R. Dall'Ara, G. Guekos, and K. J. Vahala, "Wavelength Conversion at 10 Gb/s by Four-Wave Mixing Over a 30-nm Interval," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 7, pp. 952-954, July 1998.
- [10] J. T. Verdeyen, *Laser Electronics*, Prentice Hall, New jersey, pp. 222-230, 1985.

[11] D. H. Kim, S. H. Kim, Y. M. Jhon, S. Y. Ko, J. C. Jo, and S. S. Choi, "Relaxation-free harmonically mode-locked semiconductor-fiber ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 521-523, May 1999.

[12] D. Foursa, P. Emplit, R. Leners, and L. Meuleman, "18GHz from a σ -cavity Er-fibre laser with dispersion management and rational harmonic active mode -locking," *Electronics Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 486-488, March 1997.

멜버른대학교 광자공학연구실 객원 연구원.
1990년 3월 - 현재 명지대학교 전자공학과 교수.
연구관심분야는 광통신, 광자기술, 광계측, 등임.

全 榮 民



1963년 3월 14일생. 1986년 2월 서울대학교 물리학과(공학사).
1988년 2월 KAIST 물리학과(석사).
1993년 2월 KAIST 물리학과(박사).
1993년 3월 - 1994년 9월 한국

과학기술연구원 Post-Doc.
1994년 10월 - 현재 한국과학기술연구원 선임연구원.
연구관심분야는 광통신, 광정보처리, 레이저, 등임.

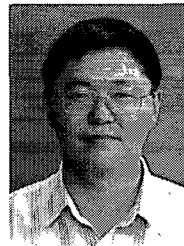
저 자 소 개

崔 景 宣



1977년 9월 5일생. 2000년 2월 명지대학교 전기전자공학부(공학사).
2000년 3월 - 현재 명지대학교 대학원 전자공학과(석사).
연구관심분야는 광통신, 광자기술, 광계측, 등임.

李 錫



1962년 9월 28일생. 1981년 2월 연세대학교 물리학과(공학사).
1987년 2월 연세대학교 대학원 물리학과(석사).
1994년 2월 연세대학교 대학원 물리학과(박사).
1994년 2월 - 1995년 2월 한국

과학기술연구원 Post-Doc.
1995년 2월 - 1996년 2월 동경대학교 전자공학부 TADA/NAKANO 연구실 객원연구원
1996년 7월 - 2001년 2월 한국과학기술연구원 선임연구원.
2001년 3월 - 현재 한국과학기술연구원 책임연구원.
연구관심분야는 광통신, 광통신용 광기능소자, 등임.

韓 鍾 珉 (正 會 員)

1975년 3월 29일생. 1999년 2월 명지대학교 전기전자공학부(공학사).
2001년 3월 - 현재 명지대학교 대학원 전자공학과(석사).
연구관심분야는 광통신, 광자기술, 광계측, 등임.

徐 東 善 (正 會 員)



1958년 2월 28일생. 1980년 2월 연세대학교 전자공학과(공학사).
1985년 8월 연세대학교 대학원 전자공학과(석사).
1989년 12월 University of New Mexico 전기공학과(박사).
1994년 7월 - 1995년 7월 호주