

## 고리형 반도체-광섬유 레이저를 이용한 파장 가변형 전광 동기 신호 재생 구현과 모델링

유봉안 · 김동환

한국과학기술연구원 광기술연구센터

이병호

서울대학교 전기공학부

(2000년 4월 4일 받음, 2000년 5월 31일 수정본 받음)

고리형 광섬유 공진기 안에 반도체 광 증폭기를 삽입하여 1530 nm에서 1570 nm까지 파장을 가변할 수 있는 전광 동기 신호 재생 방식을 제안하고 구현하였다. 임의의 파형을 갖는 10 Gbps와 30 Gbps 광 펄스열로부터 injection locking 방법에 의해 동기화된 광 펄스열을 재생하였다. 또한, 대신호 시영역 모델링을 이용하여 입력 광 펄스열의 평균 파워의 변화, 섭동에 대한 시스템의 반응을 해석하였다.

OCIS codes : 060.2330, 060.4510.

### I. 서 론

차세대 정보화 사회에서는 B-ISDN 등의 다양한 멀티미디어 서비스와 같은 초고속, 대용량의 정보를 제공하기 위해서 수 Tbps급 이상의 통신망의 구축이 필요하다. 이를 구현하기 위하여 현재 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM) 방식과 광 시분할 다중화(Optical Time Division Multiplexing, OTDM) 방식에 의한 광전송 연구가 활발히 진행되고 있다. WDM 방식은 현재까지 광범위한 연구가 이루어졌고, 어느 정도 성숙된 기술 수준에 도달하여 상용화되는 시점에 도달해 있다. 반면에 OTDM 방식은 아직 교환 및 역다중화 기술 부분에서 기술적인 어려움을 겪고 있어 이 방식의 상용화를 더디게 하고 있다. 이 부분에서는 필수적으로 동기 신호 재생 시스템이 필요한데, 기존의 전기적 PLL(Phase Locked Loop) 시스템은 처리 속도 한계(~Gbps)를 가지고 있어 이 이상의 속도에서 동작하는 새로운 시스템의 개발이 요구되고 있다. 지금까지 제안되어 연구된 방법들 중, 광학적 PLL<sup>[1]</sup>은 실용적으로 가장 가능성 있는 기술로 생각되고 있지만, 그 방법은 시스템 내부에 광 펄스 소스와 전자 제어 회로를 동시에 필요로 하기 때문에 비교적 구조가 복잡하고 경제성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 반면에 전광(all-optical) 동기 신호 재생 방법은 입력 데이터 광 펄스열을 레이저에 직접 주입시켜 능동 모드록킹이 일어나게 함으로서, 레이저 출력 단에서 동기화된 연속적인 광 펄스열 즉, 동기 신호를 얻을 수 있기 때문에 비교적 그 구조가 간단하다. 전광 동기 신호 재생 방법 중 주로 연구되고 있는 구조는 어븀 첨가 광섬유(Erbium Doped Fiber, EDF) 레이저 공진기 내에, 능동 모드록킹을 위한 스위칭이 이루어지는 비선형 매질로서 분산 천이 광섬유(Dispersion Shifted Fiber)나 반도체 광 증폭기(Semiconductor

Optical Amplifier, SOA)를 삽입한 방식이다. [2,3]

본 논문에서는 새로운 전광 동기 신호 재생 시스템으로서 간단한 고리형 반도체-광섬유 레이저(Semiconductor-Fiber Ring Laser, SFRL)<sup>[4]</sup>를 구성하고 이 레이저에 광 펄스열을 주입시켜 동기화된 연속적인 펄스열을 재생하였다. 여기에서는 SOA가 레이저 내에서 EDF를 대신한 이득 매질로서 작용할 뿐만 아니라, 입력 신호에 의해 변조되는 비선형 소자의 역할을 동시에 하고 있어 기존의 방식들에 비해 그 구조가 간단해진다. 그리고, SOA의 비선형 소자로서의 특성으로 인해 작은 입력 파워를 필요로 하고 있고 동작 파장에 제한을 받지 않는다. 이 시스템은 30 Gbps까지의 동기 신호 재생 실험 결과, 1.5  $\mu\text{m}$  파장 대에서 원하는 파장의 동기 신호를 레이저 공진기 내에 삽입된 파장 가변 필터를 tuning함으로써 재생할 수 있었다. 또한, 시스템 특성에 미치는 여러 가지 파라미터들의 영향을 대신호 시영역 모델링을 통하여 해석하였다.

### II. 고리형 반도체-광섬유 레이저의 구성 및 동기 신호 재생

그림 1은 연구에 사용된 실험 구성도를 보여 주고 있다. 입력 펄스 광원으로는 능동 조화 모드록킹된 EDF 레이저를 사용하였다. EDF 레이저의 리튬니오베이트 광세기 변조기에 인가되는 RF 신호 발생기의 주파수를 조화수에 맞추거나 조화수에서 약간 detuning함으로써, 일정한 광 펄스열 혹은 임의로 발진하는 광 펄스열을 생성시킨 다음, 광 결합기를 통해 SFRL에 주입시킨다. SFRL의 구성 소자는 편광 조절기, 가변형 광 지연 선로, 출력 가변 광섬유 커플러, 1.2 nm 투과 대역폭의 파장가변 필터, 편광 무의존성 광 고립기, 그리고 SOA이다. 사용한 SOA는 길이가 1 mm, carrier life time이

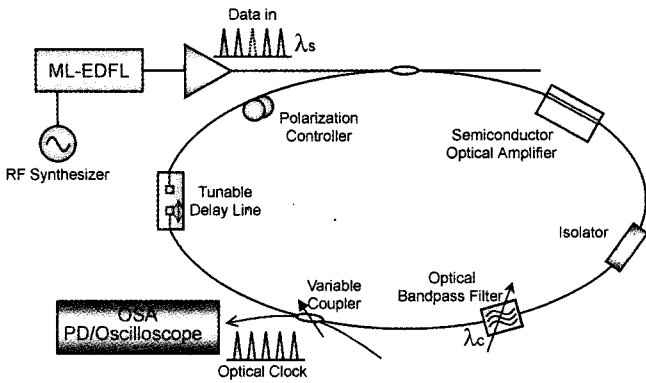


그림 1. SFRL을 이용한 전광 동기 신호 재생 실험 구성도.

2 ns 정도이고 양면에 반사율이  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  정도가 되도록 무반사 박막증착되었으며, 200 mA의 최대 펌핑 전류에서 약 23 dB의 fiber-to-fiber 이득과 7.5 dBm 정도의 포화 출력 파워를 가지고 있다. 각 구성 소자는 단일 모드 광섬유와 FC 또는 SC 커넥터로 연결되어 있어 각 구성소자의 위치를 쉽게 바꿀 수 있도록 하였다.

광 펄스열이 SFRL에 들어오면, 광 지연 선로를 조정하여 공진기 내부의 조화 주파수와 입력 광 펄스열의 기본 주파수를 맞추어 동기 신호를 재생한다. 그림 2는 SOA의 펌핑 전류가 150 mA일 때, 파장이 1548.3 nm이고 평균 파워가 -8.6 dBm인 10 Gbps 입력 신호 펄스열에 의해 다시 재생된 동기 신호 펄스열과 광 스펙트럼을 보여 주고 있다. 광 펄스 파형은 45 GHz 밴드 폭의 광검출기와 50 GHz 밴드 폭의 샘플링 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 이 때, 동기 펄스열의 파장은 1544.3 nm이고 평균 파워가 약 4 dBm 정도였다. 입력 반복률이 공진 주파수로부터 멀어지게 되면, 동기 신호 펄스열은 DC 레벨이 점점 높아지게 되어 변조 지수가 낮아지게 된다. 변조 지수 0.5를 locking 영역의 양단 기준으로 정하면, 이 시스템은 10 Gbps 기준 입력 반복률에 대하여 ~2 MHz 정도의 넓은 locking 영역을 갖는다. 그림 3은 앞에서 설명한 RF 신호 발생기의 주파수를 EDF 레이저 공진기의 조화 주파

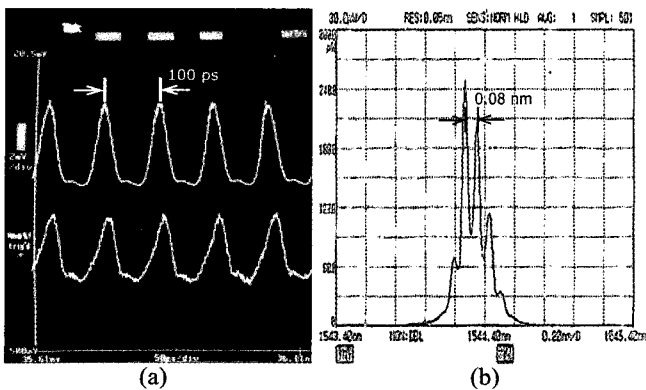


그림 2. 10 Gbps 입력 펄스열로부터 재생된 동기 펄스열과 그 스펙트럼. (a) 10 Gbps 입력 펄스열(위)과 재생된 동기 펄스열(아래), (b) 재생된 10 Gbps 동기 신호 펄스열의 스펙트럼.

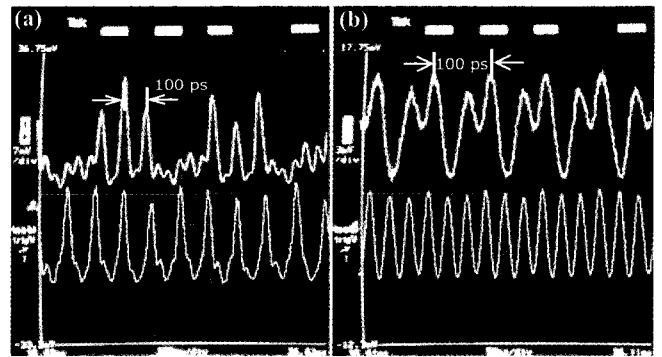


그림 3. 임의의 파형을 갖는 입력 펄스열과 재생된 동기 펄스열. (a) 임의의 파형의 10 Gbps 입력 펄스열(위)과 재생된 동기 펄스열(아래), (b) 임의의 파형의 30 Gbps 입력 펄스열(위)과 재생된 동기 펄스열(아래).

수로부터 약간 detuning함으로써 얻은 임의의 입력 파형에 대해서도 거의 일정한 진폭의 동기 펄스열을 재생할 수 있음을 보여주고 있다(그림 3(a) 10 Gbps: 불규칙적인 패턴, (b) 30 Gbps: '110'의 규칙적인 패턴). 특히 (a)의 입력 데이터는 각 bit에 해당하는 신호가 '0'레벨과 '1'레벨을 불규칙하게 왕복하는 불안정한 패턴으로서 레이저의 비선형적인 혹은 chaotic 현상에 의해 생성되는 것으로 보인다. 이 때, SOA의 펌핑 전류는 150 mA이고, 입력 펄스열이 10 Gbps인 경우 입력 평균 파워 -6.6 dBm에 대하여 약 1 dBm의 출력 평균 파워를 가지며, 입력 펄스열이 30 Gbps인 경우 입력 평균 파워 -6.6 dBm에 대하여 약 6 dBm 정도의 출력 평균 파워를 갖는다. 이 결과로부터 이 시스템은 실제적으로 RZ 형식의 디지털 신호 '0'이 포함된 데이터 펄스열로부터 동기 펄스열을 재생할 수 있음을 알 수 있다. 그리고, 이 그림에서와 같이 수십 ps 정도의 지터가 가지고 있는 입력 펄스열에 대해서도 지터가 크게 감소된 동기 펄스열을 성공적으로 재생할 수 있음을 볼 수 있다. 또한, 이 시스템은 파장가변 필터를 조정하여 SOA의 ASE 대역에 해당하는 1530 nm에서 1570 nm까지 40 nm에 걸쳐 동기 펄스열의 파장을 조정할 수 있다.

그림 4는 입력 펄스열의 평균 파워가 변함에 따라 달라지는 동기 펄스열의 파형을 보여 주고 있다. 즉, SOA의 펌핑 전류가 150 mA로 고정되고, 입력 펄스열의 평균 파워가 (a) -16.4 dBm, (b) -8.6 dBm, (c) -4.1 dBm로 바뀔 때 변화하는 동기 펄스열의 파형을 나타내고 있으며, 이 때, 동기 펄스열의 평균 파워는 각각 (a) 3.9 dBm, (b) 3.0 dBm, (c) -3.2 dBm이었고, 변조 지수(modulation index)는 각각 (a) 0.2, (b) 0.6, (c) 1.0이었다. 즉, 입력 파워가 작을 때, 동기 펄스는 평균 파워가 커지는 대신에 펄스 폭이 넓고 변조 지수가 작아지고(그림 4(a)), 반대로 입력 파워가 커지면, 평균 파워는 작아지는 대신에 펄스 폭이 줄고 변조 지수는 커진다(그림 4(c)). 이러한 현상은 SOA 내의 이득과 비선형 스위칭 효과의 trade-off에 의한 것이다. 다시 말해서, 그림 4(a)와 같이 SOA에 주입되는 펄스열의 파워가 작으면, 레이저 발진에 충분한 이득을 갖는 대신에 모드록킹에 필요한 스위칭이 잘 이루어지지 않아 동기 펄스열은 바이어스 부분이 많이 올라가고 펄스 폭이 넓어지게

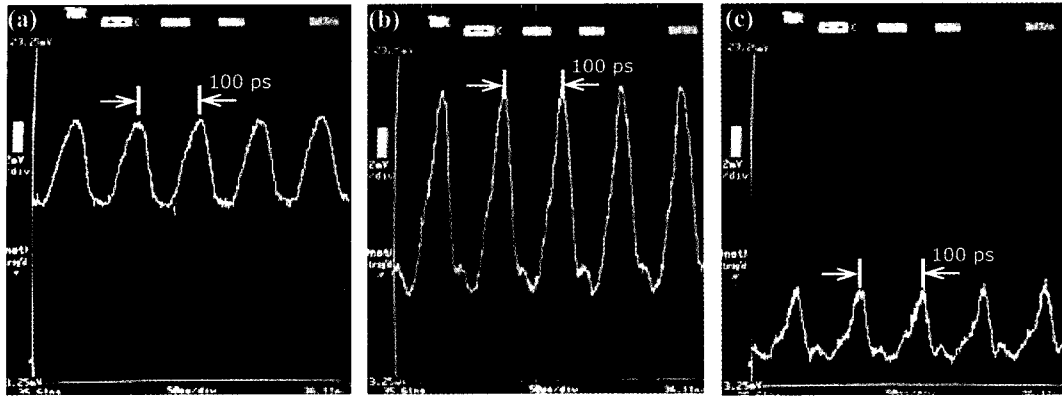


그림 4. 10 Gbps 입력 펄스열의 평균 파워에 따른 재생된 동기 펄스열의 파형 변화. (a) 입력 펄스열의 평균 파워가 -16.4 dBm일 때 재생된 동기 펄스열, (b) 입력 펄스열의 평균 파워가 -8.6 dBm일 때 재생된 동기 펄스열, (c) 입력 펄스열의 평균 파워가 -4.1 dBm일 때 재생된 동기 펄스열.

된다. 반면에 그림 4(c)와 같이 SOA에 주입되는 펄스열의 파워가 커지면, 모드록킹에 필요한 스위칭 작용이 충분히 일어나지만, 동기 펄스열이 발전하는 데 필요한 SOA에서의 이득이 작아져 변조 지수가 큰 대신에 전체적으로 평균 파워가 작아지는 결과를 가지게 된다. 위 결과로 볼 때, 이 SFRL은 입력 펄스열의 평균 파워를 -6 dBm 정도로 유지한다면, DC 레벨이 없고 높은 평균 출력 파워를 갖는 안정된 동기 신호 재생 시스템으로 동작할 수 있다.

### III. 대신호 시영역 모델을 이용한 시스템 특성 해석

앞에서 구현한 동기 신호 재생 시스템의 특성을 살펴보기 위하여 SFRL을 대신호 시영역 진행과 방정식<sup>16,17</sup>을 이용하여 모델링하였다. 그림 5는 모델링된 SFRL을 보여주고 있다. SOA 내에서의 길이 방향으로의 carrier 밀도 및 photon 밀도의 불균일성을 고려하기 위해 SOA를 여러 개의 부분으로 나눈 다음, 각 부분에서 다음과 같은 시간 의존형 진행과 방정식과 carrier rate 방정식을 풀었다.

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial E^\pm(z, t)}{\partial t} \pm \frac{\partial E^\pm(z, t)}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha \Gamma g_m(z, t) E^\pm(z, t) + \frac{1}{2} g(z, t) E^\pm(z, t) + \xi^\pm(z, t) \quad (1)$$

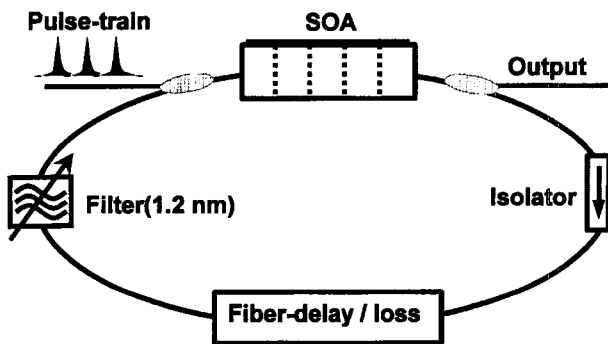


그림 5. 모델링된 SFRL의 개략도.

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - c_1 N(z, t) - c_2 N^2(z, t) - c_3 N^3(z, t) - v_g \Gamma g_m(z, t) S(z, t) \quad (2)$$

여기에서,  $E$ 는 전자기 파,  $N$ 은 carrier 밀도,  $S$ 는 photon 밀도,  $I$ 는 펌핑 전류,  $v_g$ 는 광 펄스의 군속도,  $\alpha$ 는 linewidth enhancement factor,  $\Gamma$ 는 confinement factor,  $q$ 는 carrier의 전하량,  $V$ 는 SOA의 전체 active 부피,  $c_1, c_2, c_3$ 는 recombination rate,  $\xi$ 는  $E$ 에 결합되는 spontaneous 방출 잡음을 나타낸다. 그리고,  $g_m$ 은 매질 이득,  $g$ 는 순수 이득을 나타내며 다음과 같은 관계식들에 의해 표현된다.

$$g_m(z, t) = \frac{a(N(z, t) - N_0)}{1 + \epsilon S(z, t)} \quad (3)$$

$$g(z, t) = \Gamma(g_m(z, t) - \alpha_a) - (1 - \Gamma)\alpha_c - \alpha_{scat} \quad (4)$$

여기에서,  $a$ 는 differential 이득,  $N_0$ 는 transparency에서의 carrier 밀도,  $\epsilon$ 는 이득 compression factor,  $\alpha_a$ 는 active 층에서의 손실,  $\alpha_c$ 는 cladding에서의 손실,  $\alpha_{scat}$ 는 산란 손실을 나타낸다.

표 1. SFRL 모델링에 사용된 파라미터값

파라미터	값
$a$ Differential gain	$2.5 \times 10^{-20}$ (m <sup>2</sup> )
$\Gamma$ Confinement factor	0.6
$L$ SOA length	1000 (μm)
$w$ Active layer width	1 (μm)
$d$ Active layer thickness	0.2 (μm)
$\alpha$ Linewidth enhancement factor	5
$\beta$ Spontaneous emission coupling factor	$2 \times 10^{-5}$
$c_1$ Recombination coefficient	$5 \times 10^8$ (s <sup>-1</sup> )
$c_2$ Recombination coefficient	$2.5 \times 10^{-17}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
$c_3$ Recombination coefficient	$9.4 \times 10^{-41}$ (m <sup>6</sup> ·s <sup>-1</sup> )
$v_g$ Group velocity	$7.5 \times 10^7$ (m·s <sup>-1</sup> )
$N_0$ Carrier density at transparency	$1.1 \times 10^{24}$ (m <sup>-3</sup> )
$\epsilon$ Nonlinear gain compression factor	$1.3 \times 10^{-23}$ (m <sup>3</sup> )
$\alpha_a$ Loss in active layer	$140 \times 10^2$ (m <sup>-1</sup> )
$\alpha_c$ Loss in claddings	$20 \times 10^2$ (m <sup>-1</sup> )
$\alpha_{scat}$ Scattering loss	$10 \times 10^2$ (m <sup>-1</sup> )

SOA를 몇 개의 부분으로 나누느냐에 따라 모델링의 오차와 전체 시뮬레이션 소요 시간이 서로 trade-off되면서 바뀌게 된다. 시뮬레이션의 샘플링 시간 간격  $\Delta t$ 는 SOA의 잘게 나눈 부분의 길이  $\Delta L$ 에 비례하여  $\Delta t = \Delta L/v_g$ 의 관계를 갖게 되므로, SOA내의 불균일성을 정확히 고려하기 위하여 더욱 잘게 나누면 더 많은 시간이 소요가 된다. 여러 가지의 부분 수에 대하여 시뮬레이션해 본 결과, 대략 10개 정도로 SOA를 나누면, 거의 오차 없이 데스크탑 PC에서 수 분 내에 한번의 공진기 왕복 시간 동안에 해당하는 시뮬레이션을 할 수 있다.

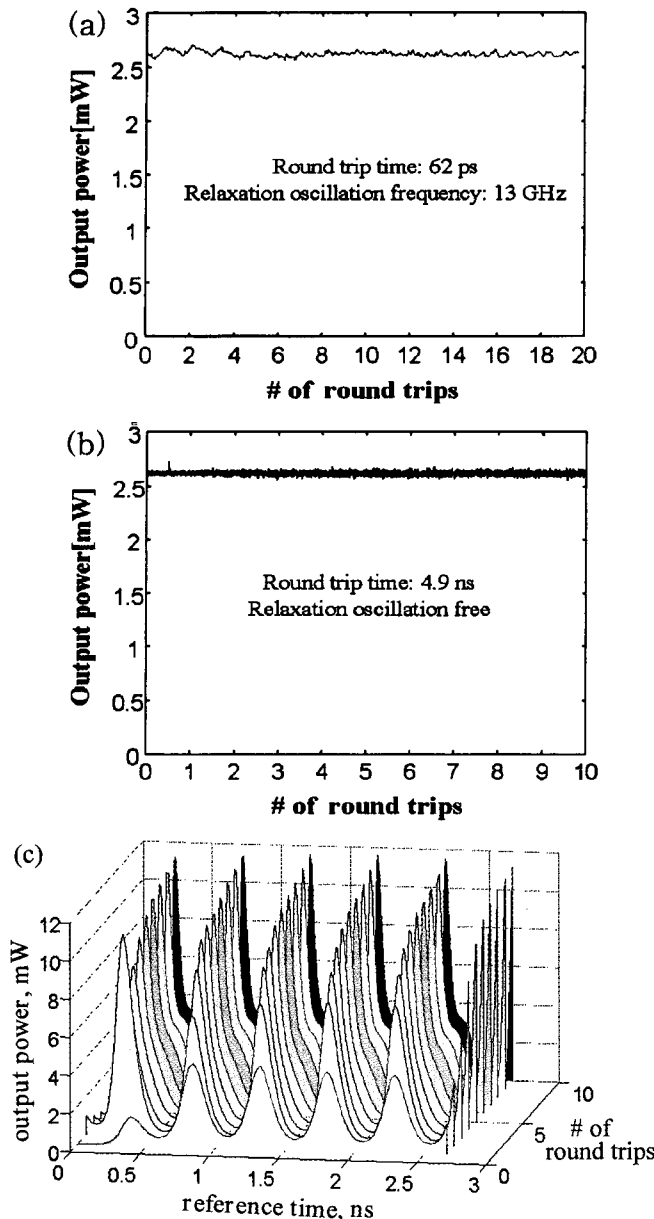


그림 6. SFRL의 광섬유 길이에 따른 동적 특성. (a) 광섬유 길이가 0.01 m일 때, SOA 펌핑 전류의 10% 섭동에 대한 출력 파워의 변화, (b) 광섬유 길이가 1 m일 때, SOA 펌핑 전류의 10% 섭동에 대한 출력 파워의 변화, (c) 광섬유 길이가 5 m일 때, SOA 펌핑 전류의 변조(60 mA~120 mA)에 대한 출력 파워의 변화.

광섬유 공진기 부분은 그 길이가 수 m 정도로 분산 및 비선형 효과를 무시할 수 있으므로, 단순한 FIFO(first in first out) 지연 선로로서 모델링하였으며, 광 필터는 시간축상에서 직접 구현이 가능한 디지털 필터로 모델링하였다. 위의 파라미터들은 SOA의 제조사인 Alcatel사(1901)에서 제공한 값들과 다른 논문들에서 대표적으로 사용하고 있는 값들을 사용하였다(표 1). SOA를 제외한 공진기 내부의 총 손실을 16 dB로 가정했을 때, 모델링된 SFRL의 문턱 전류는 대략 60 mA이다.

SFRL은 광섬유 공진기 길이가 수 m 정도 되면, 이득 매질인 SOA의 carrier life time(2 ns)이 공진기 왕복시간(수십 ns)에 비해 충분히 작으므로 relaxation oscillation 현상이 일어나지 않으므로 EDF 레이저에 비해 단기간 진폭이 안정된 특성을 보인다.<sup>[4,5]</sup> 그림 6(a)와 (b)는 모델링된 SFRL이 광섬유 길이에 따라 외부 섭동에 대해 다르게 반응하여 나타나는 출력 파형을 보여 주고 있다. 외부 섭동은 SOA의 펌핑 전류가 90 mA에서 5 ps동안 10%, 즉 9 mA 만큼 증가하는 것으로 모델링하였다. 그림 6(a) (광섬유 길이 : 0.01 m)에서와 같이 광섬유 공진기 왕복 시간(62 ps)이 SOA의 carrier life time 보다 짧으면 relaxation oscillation 현상(공진 주파수 : 13 GHz)이 나타났으며, 그림 6(b) (광섬유 길이 : 1 m)에서와 같이 공진기 왕복 시간이 SOA의 carrier life time 보다 충분히 길면, relaxation oscillation 현상이 사라지는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성은 SFRL이 펌핑 전류 변조, 혹은 외부에서 주입되는 광 펄스열에 의해 모드록킹되는 과정에서도 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 6(c)는 광섬유 공진기 길이가 5 m일 때, 기본 공진 주파수의 50번째 조화 주파수인 2 GHz로 펌핑 전류를 60 mA에서 120 mA로 변조하여 조화 모드록킹시킨 펄스열이 공진기 왕복 횟수에 따라 변화되는 모습을 보여 주고 있다. Relaxation oscillation이나 spiking 현상이 거의 일어나지 않고, 안정된 펄스열이 얻어짐을 볼 수 있다.

그림 7은 SOA의 펌핑 전류가 120 mA일 때, 입력 광 펄스열의 평균 파워에 따른 동기 신호 펄스열 파형의 변화를 시뮬레이션으로 보여주는 그림으로서, 위 II장의 실험결과(그림 4)와 똑같은 경향을 보여 주고 있다. 즉, 입력 광 펄스열의 평균 파워가 작을 경우에는 SOA의 이득은 동기 신호 발전에 충분한 반면에 상호 이득 변조와 상호 위상 변조에 필요한 비

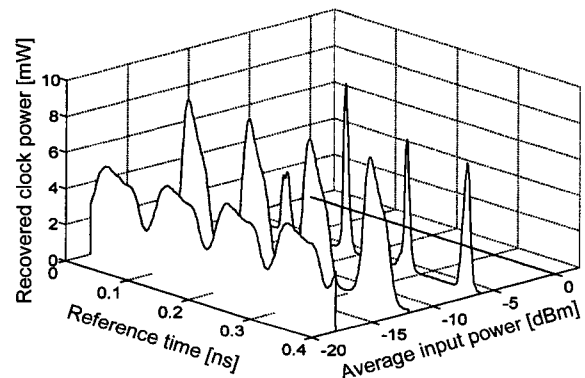


그림 7. 10 Gbps 입력 펄스열의 평균 파워의 변화에 따른 동기 펄스열의 파형 변화.

선형성이 작아지므로, 평균 파워는 높지만 펄스 폭이 넓고 변조 지수가 작은 동기 신호 펄스를 얻게 된다. 반대로, 입력 평균 파워가 큰 경우에는 SOA의 이득이 너무 소모되어 비선형성이 커진 반면에 동기 신호가 발진하기에 부족한 이득이 되어 펄스 폭이 좁고 변조 지수가 커진 대신에 불안정한 출력을 갖거나 결국 발진하지 않게 된다.

#### IV. 결 론

고리형 광섬유 공진기 내에 이득 매질로 EDF 대신 SOA를 사용하여 SFRL를 구성하고 이 레이저에 RZ 형식의 광 데이터 펄스열을 주입시켜 동기화된 연속적인 펄스열을 재생하였다. 이 때, SOA 하나가 레이저 내의 이득 매질로서 작용할 뿐만 아니라, 입력 신호에 의해 변조되는 비선형 소자의 역할을 동시에 하고 있어 이 시스템은 기존의 방법들에 비해 그 구조가 간단하다는 장점을 가지고 있다. 또한, SOA의 큰 비선형성으로 인해 입력 파워가 작고 공진기 길이가 줄어들게 된다. 이러한 집적 효과로 인해 동기 신호가 발진하기 위해 필요한 SOA 내의 이득과 비선형성 사이에 trade-off가 발생하는 데, 입력 광 펄스열의 평균 파워를 조절하여 펄스 폭이 좁고 변조 지수가 큰 동기 신호 펄스열을 얻을 수 있다. 이 시스템은 광섬유 공진기 내에 파장 가변 필터를 삽입하여 SOA의 ASE 대역(40 nm) 안에서 동기 신호 파장을 바꿀 수 있

었다. 또한, SFRL을 대신호 시영역 진행파 방정식을 이용하여 모델링함으로써, 광섬유 길이, 입력 광 펄스열의 평균 파워 등 여러 파라미터가 시스템 특성에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 이를 통해 광섬유 길이가 1 m 이상이고 입력 펄스열의 평균 파워가 고정되도록 설계한다면, SFRL은 초고속 정보 처리 분야에서 동기 신호 재생 장치로서 충분히 활용이 가능할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] O. Kamatani, S. Kawanishi, and M. Saruwatari, *Electron. Lett.* **30**, 807 (1994).
- [2] D. M. Patrick and R. J. Manning, *Electron. Lett.* **30**, 151 (1994).
- [3] S. Bigo and E. Desurvire, *Electron. Lett.* **31**, 1855 (1995).
- [4] D. H. Kim, S. H. Kim, Y. M. Jhon, S. Y. Ko, J. C. Jo, and S. S. Choi, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**, 521 (1999).
- [5] A. Yariv, *Optical Electronics*, 4th ed. (Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, Orlando, USA, 1991), 576.
- [6] L. M. Zhang, S. F. Yu, M. C. Nowell, D. D. Marcenac, J. E. Carroll, and R. G. S. Plumb, *IEEE J. Quantum Electron.* **30**, 1389 (1994).
- [7] M. G. Davis and R. F. O'Dowd, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **4**, 838 (1992).

### Implementation and modeling of wavelength tunable all-optical clock recovery using a semiconductor-fiber ring laser

Bong-Ahn Yu and Dong Hwan Kim

*Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea*

ByoungHo Lee

*School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

(Received April 4, 2000, Revised manuscript received May 31, 2000)

A wavelength tunable all-optical clock recovery using a semiconductor optical amplifier in a fiber ring cavity is proposed and demonstrated at the wavelength of 1530 nm to 1570 nm. A synchronized optical pulse train is recovered from 10 Gbps and 30 Gbps randomly generated optical pulse streams with injection locking technique. Also, the system responses to the perturbation and the input average power variation are analyzed by a large-signal model based on time-domain travelling wave equation.

OCIS codes : 060.2330, 060.4510.