

고차 조화 모드록킹된 반도체-광섬유 레이저 구성과 출력 광펄스의 압축

김동환 · 김상혁 · 조재철 · 최상삼
 한국과학기술연구원 광기술연구센터

(1998년 11월 23일 받음 1998년 12월 29일 수정본 받음)

광반도체 증폭기를 이용하여 1.5 μm 파장 영역에서 발진하는 조화 모드 록킹된 10 GHz 고리형 반도체-광섬유 레이저를 구현하였다. 레이저 펄스폭은 13~18 ps이고, 파장 선포는 0.4~0.6 nm이며, 양으로 주파수 처핑되었다. 2 km 길이의 표준 단일 모드 광섬유를 이용하여 4 dBm의 평균 출력을 갖는 레이저 펄스를 광섬유의 균분산 보상에 의해 펄스폭을 최대 6.8 ps 까지 압축시켰다.

I. 서 론

최근 초고속 대용량 광통신 시스템을 구현하기 위해 파장 다중화(Wavelength Division Multiplexing) 또는 시분할 다중화(Optical Time Division Multiplexing) 방식에 의한 광전송 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 각각의 전송광원은 다중화 특성상 WDM은 다채널 파장발진이 가능한 파브리-페롯형 반도체 레이저를 중심으로 진행되고 40 Gbps 이상의 OTDM은 초고속 펄스열을 구현하기가 용이한 모드록킹된 광섬유 레이저를 중심으로 시스템이 구축되고 있다.^[1-2] 그런데 OTDM에 이용되는 모드록킹된 광섬유 레이저는 공진기 길이가 어븀-첨가 광섬유 증폭기(EDFA) 특성상, 십 수미터 이상이 되어 10 GHz 반복율을 얻기 위해서는 고차 조화 모드 록킹 방법을 채택한다.^[3-5] 이때, 이득 매체로서 사용되는 어븀-첨가 광섬유의 상준위 여기 시간이 수 밀리 초로 길기 때문에 주위 환경의 작은 섭동에 의해 relaxation oscillation에 의한 출력 펄스열의 불안정성이 존재한다. 여기서 이득매질로서 EDFA 대신 반도체 광증폭기(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)를 사용하면 공진기 길이의 감소에 의한 펄스출력의 불안정성의 향상을 기대할 수 있다. 그러나 SOA는 이득변조 또는 손실변조에 따라 음 또는 양의 주파수 처핑이 유도되어 이를 적절히 보상해 주어야 장거리 전송에 따른 분산효과를 줄일 수 있다.

본 논문에서는 이득 매질을 어븀-첨가 광섬유 대신 반도체 광증폭기를 사용하여 1.5 μm 파장대에서 발진하는 모드 록킹된 고리형 반도체-광섬유 레이저를 구성하여 이의 발진 특성을 조사하였으며, 발진 레이저의 시간-선폭 곱으로부터 시간 평균된 처핑 변수를 측정하여 적절한 길이의 광섬유로 이를 보상함으로써 광 펄스를 압축시켰다.

II. 모드 록킹된 반도체-광섬유 레이저

모드 록킹된 고리형 반도체-광섬유 레이저의 구성도는 그

림 1과 같으며, 구성소자는 편광 조절기, 1.2 nm 밴드폭의 파장가변 필터, 출력 가변 커플러, 리튬나오베이트 광세기 변조기, 편광 무의존성 고립기 와 이득체로서의 반도체 광증폭기(SOA)이다. 사용한 SOA는 carrier life time이 800 ps인 Alcatel사(1901) 제품으로, 양면에 반사율이 10^{-3} ~ 10^{-4} 정도의 무반사 박막증착된 반도체 증폭기로서 fiber-to-fiber 이득은 약 23 dB(@200mA)이고 ASE 선포는 40 nm 정도이며 TE/TM 모드간의 이득차는 0.9 dB 이하로 매우 작다. 각 구성소자는 단일 모드 광섬유와 FC 또는 SC 커넥터로 연결되어 있어 각 구성 소자의 위치를 쉽게 바꿀 수 있으며, 커넥터 단면에서 발생하는 공진기의 내부 반사 효과를 최대한 줄이기 위해 매번 세심한 세척이 필요하였다. 모드록커로 사용된 광세기 변조기는 마하젠더 간섭형이고 입력단에 편광 조절기를 두어 TE 모드에서 최대의 변조폭을 나타내도록 조절하였다. 10 GHz의 반복율을 가진 펄스를 얻기 위해 RF 신호 발생기(Wiltron, 68037B)를 사용하여 기본 모드록킹 주파수(11.94MHz)의 838번째 조화 주파수인 10.002 GHz의 RF 신호를 광변조기에 인가하였다. 고리형 반도체 레이저의 편광 불안

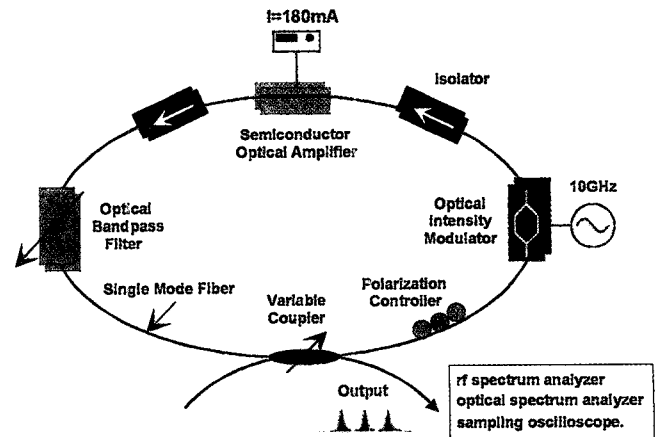


그림 1. 능동형 모드 록킹된 반도체-광섬유 레이저의 구성도

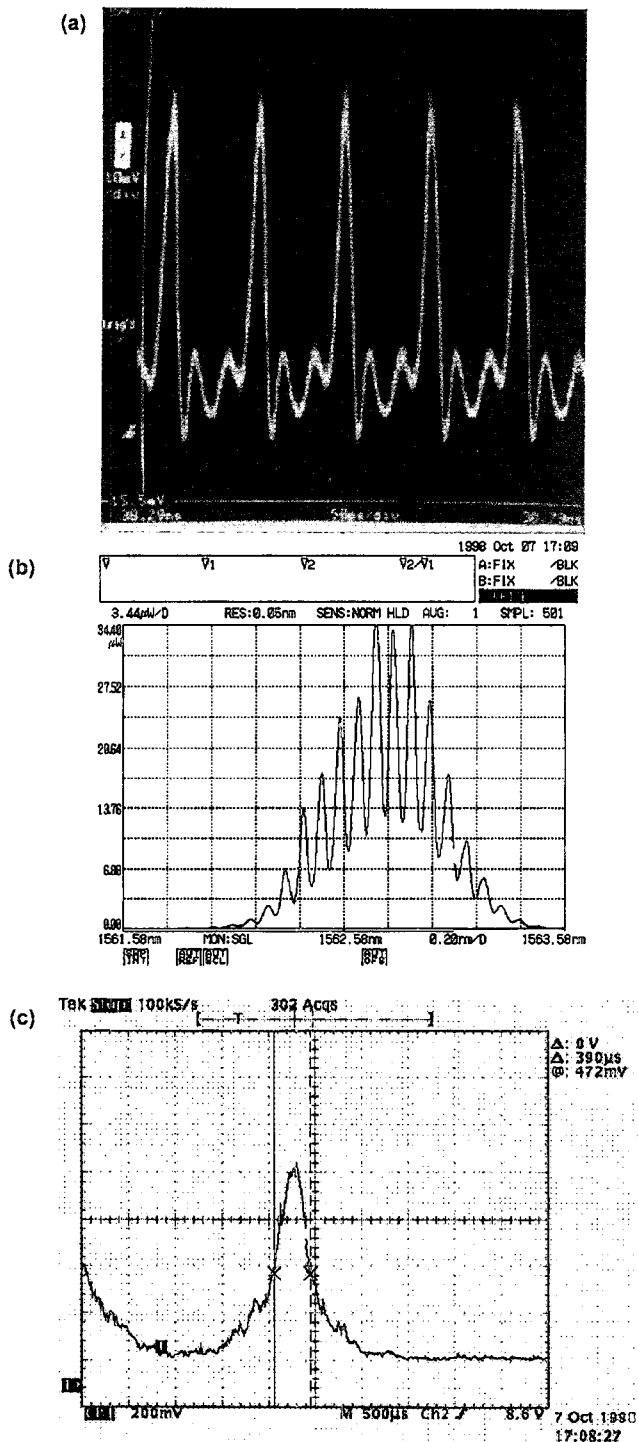


그림 2. 반도체-광섬유 레이저의 광펄스 특성. (a) 10 GHz 펄스열 모양, 펄스-펄스 간격: 100 ps (b) 선폭 0.6 nm의 광스펙트럼, 0.2 nm/Div (c) Autocorrelator로 측정된 펄스의 모양(펄스폭 환산비율: 17 ps/500 μs, 펄스폭: 13.3 ps).

정성을 억제하기 위해 공진기를 이루는 광섬유는 모두 테이블에 테이블로 고정시켜서 진동에 의한 편광 불안정성을 최소화 하였다.

그림 2는 1562 nm에서 10 GHz의 비교적 안정된 출력 펄스열과 광 스펙트럼을 나타내며 광 스펙트럼의 발진 모드 간

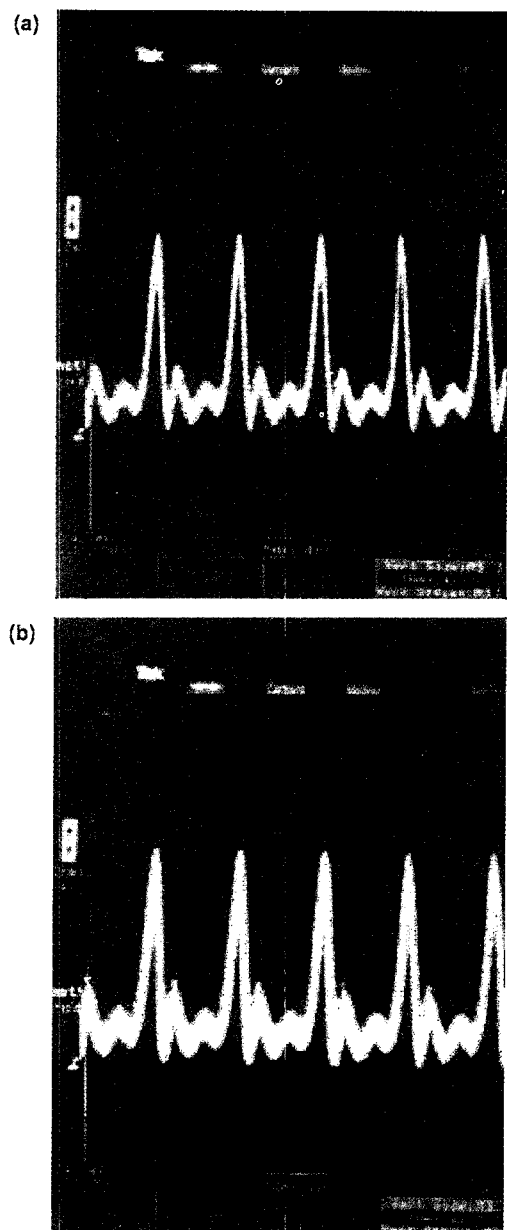


그림 3. 10 GHz 반도체-광섬유 레이저의 진폭 및 시간 jitter 특성, 펄스-펄스 간격: 100 ps (a) 1 분간 광 펄스열의 누적 측정, 50 ps/Div. (b) 15 분간 누적 측정, 50 ps/Div.

격이 0.08 nm로서 10 GHz 간격으로 모드록킹 주파수와 일치함을 나타내었다. 광 스펙트럼의 반치폭은 0.6 nm이고 광펄스 폭은 가우시안 펄스임을 가정할 때 Autocorrelator (Femtochrome, FR-103XL)로 측정된 결과 그림 2(c)에 나타나듯이 13.3 ps이었다. 광펄스 폭과 파장 선폭의 곱($\Delta\tau \cdot \Delta\nu$)는 2.3으로서 (푸리에 변환 한계값 = 0.44) 주파수 처핑이 되어 있음을 알 수 있었다. 10 GHz 펄스열과 스펙트럼은, 일단 모드록킹 영역에 들어서면 최적의 조화 주파수에서 ± 100 kHz 이내의 범위로 변조기 주파수를 변화시켜도 항상 일정한 펄스 폭과 선폭을 유지하였다. 광펄스 측정기는 45 GHz 밴드폭의 New Focus사의 ultrahigh-speed photodetector(1014)를 사용하였고, sampling 오실로스코프는 50 GHz 밴드폭의 모듈을 사

용하였다. 그림 3은 sampling 오실로스코프를 persistence mode상에서 각각 1분과 15분 동안 누적 측정하여 진폭 및 시간 jitter의 누적 효과를 관찰한 것이다. 결과에서 보듯이 어둡-침가 광섬유에서 나타나는 relaxation oscillation에 의해 야기되는 불규칙적인 진폭변화에 의한 스파이킹은 거의 관측되지 않았다.

RF 스펙트럼을 조사한 결과 relaxation oscillation이 일어나지 않음을 그림 4(a)에서 보여주고 있는데, 이는 SOA의 carrier life time이 광펄스의 공진기 1회 왕복시간에 비해 짧아서, 공진기 내부에 발생된 조그만 섭동이 더 이상 진동으로서 성장하지 않기 때문이다.^[6] 이로 인해 relaxation oscillation에 의한 스파이킹이 있는 어둡-침가 광섬유 레이저에 비해 진폭 안정성이 우수하다.

광펄스의 공진기 왕복시간이 이득 수명에 비해 매우 짧은 CW 반도체 레이저의 relaxation oscillation 특성은 섭동 이론

을 이용한 rate 방정식에서 분석 할 수있다. 반도체 레이저의 rate 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N}{\tau} - A(N - N_{tr})P$$

$$\frac{dP}{dt} = A(N - N_{tr})P\Gamma_a - \frac{P}{\tau_c}$$

$$N = N_0 + N_1(t), P = P_0 + P_1(t), N_1 \ll N_0, P_1 \ll P_0$$

여기서, N 은 전자 밀도, I 는 펄핑 전류, P 는 광자 밀도를 나타내며, τ 와 τ_c 는 각각 carrier life time과 공진기 내에서의 광자 수명을, Γ_a 는 confinement factor, $A(N - N_{tr})P$ 는 단위 부피당 유도전이 확율을 나타낸다. N_{tr} 은 밀도반전이 일어나기 시작하는 임계 전자밀도이다. 위 조건에서 섭동항에 대한 방정식을 유도할 수 있는데, 광자 밀도의 섭동항(P_1)에 대한 2차 방정식은 다음과 같은 RLC 진동 방정식과 같다.

$$\frac{d^2P_1}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau} + AP_0\right)\frac{dP_1}{dt} + \frac{AP_0}{\tau_c} = 0$$

$P_1 \propto e^{qt}$ 에서 q 가 실수를 갖기 위한 조건, 즉, P_1 이 진동하지 않을 조건은 다음과 같다.

$$\frac{AP_0}{\tau_c} - \frac{1}{4}\left(\frac{1}{\tau} + AP_0\right)^2 \leq 0$$

반도체 레이저는 일반적으로, $\tau \sim 800$ ps, $AP_0 \sim 10^9$ s⁻¹의 값을 가지며, 광자 수명 시간은 공진기 길이에 따라 달라지는데, 내부 손실을 무시하면 $\tau_c = -\frac{nL}{c \ln(1-R)}$ 로 표현되어 커플링

비율이 1:9인 경우 공진기 길이가 16 m이면, τ_c 는 760 ns이며 내부 손실을 고려해도 100 ns 이상이다. 따라서, 이들 변수 값을 십 수미터 길이의 반도체 레이저 공진기에 대입하면 위의 조건이 쉽게 만족한다. 한편, 수 백 마이크로미터의 짧은 공진기 길이로 구성된 반도체 레이저의 경우에는 파브리-페롯형의 수 백 마이크로미터 길이의 공진기내의 1회 왕복 시간이 수 피코초 정도로 짧아 보통 수 GHz의 relaxation oscillation 주파수 성분이 존재한다. 그러나, 본 레이저와 같이 SOA를 이용한 십 미터 이상의 긴 공진기 구성에서는 섭동에 대해 초과 감쇄 진동(over-damping oscillation)이 일어나서 relaxation oscillation이 존재하지 않는다. 이는 광자 수명 시간과 이득체의 여기 시간 상수를 각각 이에 상응하는 질량과 스프링 상수로 특징 지어지는 단진자 운동에 유추하여 설명할 수 있다. 따라서, 공진기 광자수명이 이득체 여기 시간수에 비해 대단히 큰 경우는 스프링 상수에 비해 질량이 대단히 크므로 초과 감쇄가 일어나서 relaxation oscillation이 일어나지 않는다. 즉 공진기 내의 조그마한 섭동은 레이저 출력에 영향을 주지 않고 급격히 감쇄가 된다고 볼 수 있다.

한편, 조화 모드록킹이기 때문에 항상 10 GHz의 슈퍼 모드 그룹(super-mode set)이 12 MHz 간격으로(공진기 모드 간격) 존재하는데 모드록킹 주파수를 정확히 조정하면, 이들 슈퍼 모드중 한 그룹만이 발진 가능성이 가장 높게 되어 그 슈퍼 모드 그룹만을 고정적으로 발진시킬 수 있다. 이는 광 변조기에 인가하는 RF 주파수가 정확히 기본 공진기 주파수의 정수배

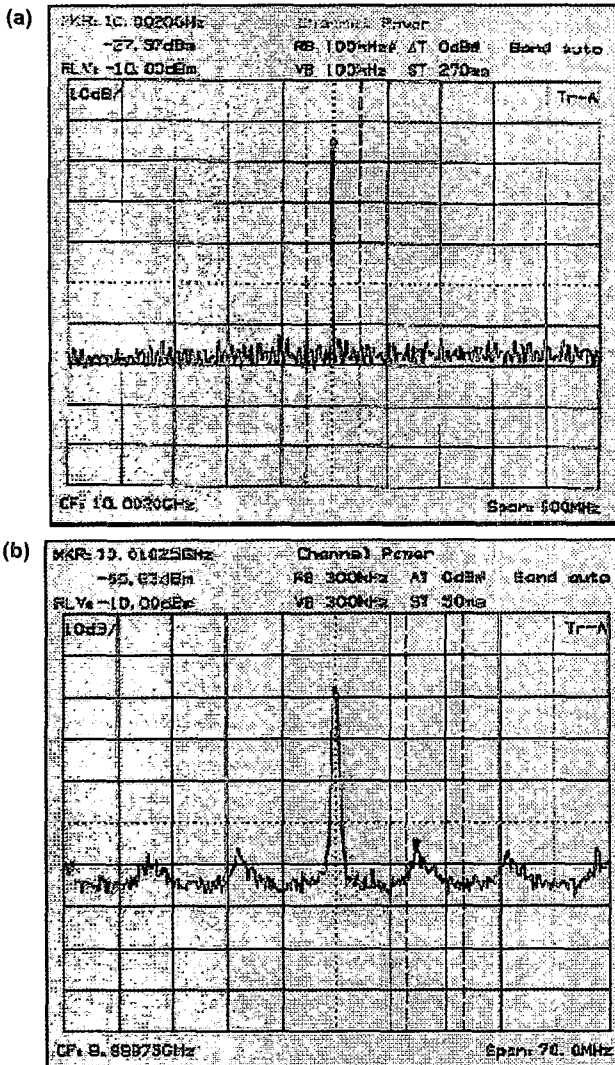


그림 4. 반도체-광섬유 레이저의 RF 스펙트럼 특성. (a) Relaxation oscillation이 없는 10 GHz RF 스펙트럼 모양, 90 MHz/Div, (b) Super-mode beating이 나타난 RF 스펙트럼 모양, 7 MHz/Div (beating 간격 : 12 MHz).

가 되어 모드록킹 대역에 들어서면 수퍼 모드 경쟁이 억압되기 때문이다. 모드 록킹 영역내에서 의도적으로 수 kHz 내에서 광 변조기에 인가하는 RF 주파수를 변화시키면 수퍼 모드 경쟁을 관측할 수 있다. 그러나, 그림 4(b)에서 보듯이 10 GHz 발진 신호와 수퍼 모드와의 신호대 잡음비는 50 dB 이상으로 매우 작다. 따라서 본 레이저 구성에서 장시간 진폭 안정화는 단일 모드 광섬유에서 비롯되는 편광 불안정성과 주위의 온도 변화에 따른 공진기 길이의 변화만을 제어하면 해결될 것으로 본다.

III. 군속도 분산 보상에 의한 광펄스 압축

광섬유 내에서 전파하는 광펄스에 대한 비선형 슈레딩거 방정식은 다음과 같다.^[7]

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A \quad (1)$$

여기서, A 는 진폭을, T 는 펄스의 군속도(v_g)로 움직이는 시간 계로서 $T = t - z/v_g$ 이다. β_2 는 군속도 분산변수, α 는 감쇄 상수이고, γ 는 비선형 굴절율에 관계되는 계수로서 단일 모드 표준 광섬유에 대해서 $1.5 \mu\text{m}$ 의 파장에서 $3 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 의 값을 가진다. 위에서 우변의 세 항들은 각각 광펄스의 흡수, 분산, 비선형 효과들을 나타낸다. 입력 광펄스의 초기 펄스폭 T_0 와 피크 파워 P_0 에 따라 군속도 분산효과가 우세한지 비선형에 의한 SPM(Self-Phase Modulation) 효과가 우세한지를 결정하게 되는데 이들 효과에 대한 특성 길이를 각각 L_D, L_{NL} 이라 하면 다음과 같다.

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}, \quad L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}$$

특히 광섬유의 길이 L 이, $L \ll L_{NL}$ 이고 $L \geq L_D$ 이면 광섬유 내에서의 비선형 효과를 무시할 수 있는데, 이 경우에는 다음과 같은 조건이 성립한다.

$$\frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|} \ll 1$$

일반적으로 펄스 폭이 수 피코 초내지 수십 피코초 범위이고 피크 파워가 1 W 미만이면 광펄스는 군속도 분산에 의한 효과만 경험하게 된다고 볼 수 있다. 실제 본 레이저의 평균 출력은 4 dBm 정도이고 반복율이 10 GHz, 펄스폭이 18 ps이므로, 이에 대해 피크 파워는 약 20 mW가 되어, $\frac{L_D}{L_{NL}}$ 는 0.06으로 비선형 효과는 무시할 수 있다. 따라서, 진폭을 다음과 같이 규격화하여 특별히 군속도 분산 효과만을 고려하는 경우를 보면 식(1)은 다음과 같다.

$$A(z, \tau) = \sqrt{P_0} e^{-\alpha z/2} U(z, \tau), \quad \tau = \frac{T}{T_0}$$

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2}$$

출력 광펄스의 해석적 분석을 위해 초기 입력 펄스를 가우시

안이라고 가정하면 광섬유 길이에 따른 군속도 분산에 의해 펄스폭은 다음과 같이 확대되고 주파수가 처평되어 있음을 알 수 있다.^[7]

$$U(0, T) = e^{-\frac{T^2}{2T_0^2}}$$

$$U(z, T) = \frac{T_0}{(T_0^2 - i\beta_2 z)^{1/2}} \exp\left[-\frac{T^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z)}\right]$$

$$T_1 = T_0 [1 + (z/L_D)^2]^{1/2}$$

따라서, 위상의 시간 의존성으로부터 생성된 주파수 처평은 위상항을 시간에 대해 미분하면 구할 수 있는데, 다음과 같이 시간에 따라 선형적으로 표현됨을 알 수 있다.

$$\delta\omega = -\frac{\partial\phi}{\partial T} = \frac{2\text{sgn}(\beta_2)(z/L_D)}{1+(z/L_D)^2} \frac{T}{T_0} \quad (2)$$

식(2)로부터 처평은 광섬유의 군속도 분산의 부호에 따라 양 또는 음으로 결정된다. 즉, $\beta_2 > 0$ (정상분산)이면 펄스 앞부분이 저주파 성분 편이가 되고, $\beta_2 < 0$ (비정상 분산)이면 고주파 성분 편이가 일어난다.

한편, 초기 입력 펄스가 다음과 같이 주파수 처평된 가우시안이면(광반도체 증폭기의 경우 이득포화에 의한 주파수 처평은 양의 선형 처평으로 근사할 수 있다.^[8])

$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{(1+iC) T^2}{2 T_0^2}\right]$$

시간-선폭 곱은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\omega T_0 = (1+C^2)^{1/2}$$

이 때, 광섬유 길이 z 를 진행한 후 펄스 확대비율은 다음과 같다.

$$\frac{T_1}{T_0} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

위의 결과에서 보면, $C\beta_2$ 의 부호에 따라 광펄스 폭이 확대될 수도 압축될 수도 있다. 즉 초기 입력 펄스가 양으로 주파수 처평되어 있으면($C > 0$), 비정상 분산영역($\beta_2 < 0$)에서는 광섬유를 진행하면서 펄스폭이 압축 되었다가 다시 확대된다. 특히 펄스 압축이 일어 나는 경우($C\beta_2 < 0$), 펄스 폭이 최소로 되는 광섬유의 길이는 식(3)에서 구할 수 있는데 다음과 같다.

$$z_{\min} = \frac{C}{1+C^2} L_D \quad (4)$$

따라서 초기 입력 펄스가 주파수 처평이 되어 있으면 이를 보상하는 군속도 분산의 광섬유를 이용하여 transform-limited 펄스폭까지 압축시킬 수 있다.

표 1은 발진 주파수 파장을 변화 시키면서 측정된 레이저의 선폭 및 펄스폭과 평균 처평 변수와 2 km의 단일 모드 광섬유를 통과 시켰을 때 측정된 펄스폭을 요약한 결과이다. 여기

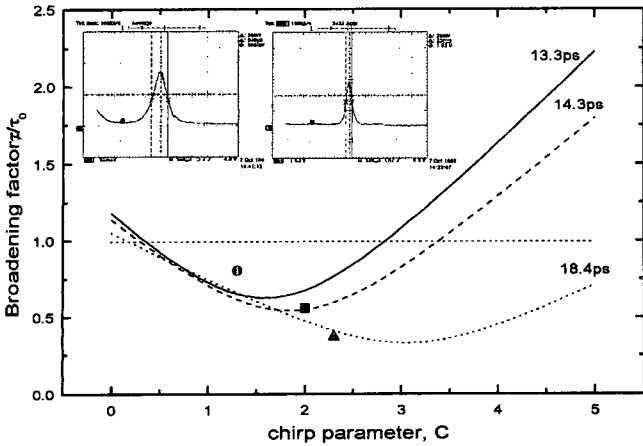


그림 5. 2 km 길이의 표준 단일 모드 광섬유를 통과한 후, 초기 입력 펄스폭에 대한 주파수 처핑 변수에 따른 펄스폭 확대/압축비 (선: 이론치, 도형: 실험치, 그래프 안의 그림은 대표적으로 입력 단에서 18.4 ps의 펄스 모양과 출력단에서의 6.8 ps로 압축된 펄스 모양을 Autocorrelator로 측정 한 것이다).

표 1. 발진 주파수 파장 변화에 따른 반도체-광섬유 레이저의 선폭 및 펄스 폭과 2 km 길이의 단일 모드 광섬유를 통과한 후에 압축된 펄스 폭 측정 결과 요약

변수/파장	@1540 nm		@1550 nm		@1560 nm	
	입력	압축후	입력	압축후	입력	압축후
$\Delta\lambda(nm)$	0.4	0.42	0.5	0.5	0.6	0.6
$\Delta\tau(ps)$	14.3	11.6	18.4	6.8	13.3	7.5
$\Delta\nu \cdot \Delta\tau$	0.72	0.61	1.1	0.43	0.98	0.56
$(=0.44\sqrt{1+C^2})$						
C	1.3	0.96	2.3	0	2.0	0.8
$L_D (Km)$	3.7		6.1		3.2	
$z_{min} (Km)$	1.8		2.2		1.3	
τ_1 / τ_0	0.81		0.37		0.56	

서, $\Delta\nu$ 는 선폭에 대응하는 주파수폭, $\Delta\tau$ 는 펄스폭, C 는 평균 주파수 처핑 변수로서 가우시안 펄스 모양을 가정하고, 선폭 및 펄스폭을 FWHM(Full width half maximum)으로 환산하면, $\Delta\nu \cdot \Delta\tau = 0.44 \sqrt{1+C^2}$ 로 표현된다. τ_1 은 광섬유를 통과한 후 펄스 폭을 나타낸다. 펄스폭 τ_0 는 FWHM으로서 앞서의 이론에서 정의한 T_0 와는 $\tau_0 = 1.665 T_0$ 의 관계를 가진다. 각각의 레이저 발진 파장에서의 출력 변수에 대해 펄스 압축에 적절한 광섬유 길이는 식(4)에서 펄스폭이 최소로 되는 광섬유 길이, z_{min} 에서 구할 수 있는데, 각각 1.8 km, 2.2 km, 1.3 km이다. 그림 5는 각각의 입력 펄스 폭에 대해 주파수 처핑 변수, C 에 따른 펄스 폭 확대/압축비를 계산한 것과 실제 측정된 결과를 도시한 것이다. 1550 nm의 레이저 파장에서 18.4 ps의 출력 펄스를 최대 6.8 ps까지 압축시켰다. 또한, 광섬유를 통과한 후 광펄스의 스펙트럼 폭은 거의 변화가 없었다. 이는 광섬유 내에서 비선형 효과에 의한 선폭 확대가 없음을 실험적으로 나타내며, 실험치와 계산 결과와의 오차는 주로 광펄

스가 가우시안 임을 가정한 데서 발생한다고 생각된다.

IV. 결 론

광섬유 레이저 시스템에서 어븀-첨가 광섬유 이득체 대신 광반도체 증폭기(SOA)를 사용함으로써 조화 모드록킹된 반도체-광섬유 레이저의 특성을 조사하였으며, 반복율이 10 GHz인 주파수 처핑이 되어 있는 13~18 ps의 광 펄스열을 얻었다. 이를 군속도 분산으로 보상할 수 있는 적절한 길이의 광섬유로서 최대 6.8 ps까지 압축시켰다. 공진기가 단일 모드 광섬유로 구성되어 있어 편광 변동에 의한 출력 불안정성이 존재하지만 긴 공진기 길이와 SOA의 빠른 carrier life time 특성상, relaxation oscillation이 없으므로 어븀첨가 광섬유에 비해 상당한 진폭 안정성을 관측하였다. 본 레이저는 잔류 주파수 처핑이 있으나 분산 효과가 크지 않는 광 PLL(Phase Locked Loop)등의 초고속 신호처리 분야에서는 활용이 가능한 초고속 광원이 될 수 있다고 본다.^[9]

참고문헌

- [1] M. Saruwatari, IEICE TRANS. COMMUN., "High-Speed Optical Signal Processing for Communications Systems", vol. E78-B, No. 5, pp. 635-643, 1995.
- [2] O. Kamatani, S. Kawanishi and M. Sawatari, "Prescaled 6.3 GHz clock recovery from 50 Gbit/s TDM optical signal with 50 GHz PLL using four-wave mixing in a travelling-wave laser diode optical amplifier", Electron. Lett., 30(10), 807 (1994).
- [3] E. Yoshida and M. Nakazawa, "Wavelength tunable 1.0 ps pulse generation in 1.530-1.555 μm region from PLL, regeneratively modelocked fibre laser", Electron. Lett., 34(18), 1753 (1998).
- [4] J. S. Wey, J. Goldhar, D. W. Rush, M. W. Chbat, G. M. Carter, G. L. Burdge, "Performance characterization of a harmonically mode-locked erbium fiber ring laser", Photon. Tech. Lett., 7(2), 152 (1995).
- [5] K. V. Reddy, I. N. Duling III, M. L. Dennis, T. F. Caruthers, "A practical, 17.5 GHz, actively mode-locked polarization-maintaining Er/Yb co-doped Panda fiber ring laser", OFC '96, TuB5, 1996.
- [6] A. Yariv, Optical Electronics 4ed, (Saunders College Pub., 1991), pp. 576-580.
- [7] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, New York, pp. 67-69, 1989.
- [8] G. P. Agrawal and N. A. Olsson, "Amplification and compression of weak picosecond optical pulses by using semiconductor-laser amplifiers", Opt. Lett., 14, 500 (1989).
- [9] 김동환, 김상혁, 전영민, 고성운, 조재철, 최상삼, "10 GHz 모드록킹된 고리형 반도체 레이저", Photonics Conference '98, pp. 19-20 (Nov. 1998, Pusan, Korea).

Harmonically mode-locked semiconductor-fiber ring laser and the output pulse compression

Dong Hwan Kim, Sang Hyuck Kim, Jae Cheol Jo and Sang Sam Choi
Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology Seoul 130-650, Korea

(Received November 23, 1998, revised manuscript received December 29, 1998)

A 10 GHz harmonically mode-locked semiconductor-fiber ring laser was implemented using a semiconductor optical amplifier at 1.5 μm . The laser pulse has 13~18 ps pulse duration, 0.4~0.6 nm spectral width and was positively chirped. The output pulse with an average power of 4 dBm was compressed to 6.8 ps using 2 km long standard single mode optical fiber.