

## 완화진동억압을 이용한 10 GHz 고조모드잠금된 그리형 어븀첨가 광섬유 레이저의 출력 안정화 및 특성 측정

장지용\* · 이유승 · 전영민

한국과학기술연구원 광기술연구센터

Ⓣ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

임동건

고려대학교 물리학과 양자광학실

Ⓣ 136-701 서울시 성북구 안암동 5-1

(2001년 9월 24일 받음, 2002년 1월 17일 수정본 받음)

마하젠더형 광세기 변조기를 이용하여 10 GHz로 고조모드잠금된 분산보상 어븀첨가 광섬유 레이저의 출력 안정화 및 독립 제어와 출력의 안정도를 측정하였다. 레이저의 출력 불안정성이 발생하였을 때 나타나는 완화진동 주파수 성분을 억압하도록 공진기 길이를 조정하여 16시간 이상 출력 안정화를 시켰다. 이때, 안정화가 진행되는 동안 rms 위상잡음과 rms 진폭잡음은 각각 260 fsec-524 fsec와 4~11.5%의 사이에 분포하였고, BER은  $10^{-13}$ 으로 측정되었다.

주제어 : fiber lasers/amps, fiber laser, ultrashort pulse.

### I. 서 론

고조모드잠금된 광섬유 레이저는 동기화된 수 피코초 이하의 펄스폭과 수십 GHz의 반복률을 얻을 수 있어 광전송시스템의 광원으로 널리 연구되고 있다. 전송효율을 높이기 위하여 광시분할 다중방식과 파장분할 다중방식이 이용되고 있는데, 이러한 다중방식에 사용되는 광원은 광펄스의 폭이 좁고 반복률이 높을수록 더 많은 채널을 수용할 수 있으므로 좁은 펄스폭의 신호를 발생하는 기법과 레이저의 출력효동에 대한 안정화, 그리고 광통신용 광원으로서의 성능 측정이 매우 중요하다.<sup>[1]</sup>

모드잠금된 광섬유 레이저의 펄스폭을 줄이기 위해서는 레이저 공진기 내에서의 군속도 분산과 비선형 효과인 자기위상변조를 이론적으로 해석하여 레이저를 제작할 필요가 있다.<sup>[2-4]</sup> 그러나, 모드잠금된 광섬유 레이저는 외부의 진동, 온도의 변화 등 작은 섭동에 의해 레이저의 출력 불안정성이 발생된다. 그러므로, 능동형으로 모드잠금된 광섬유 레이저에서의 출력효율을 극대화하기 위한 출력 안정화 방법은 다음과 같다. 불안정 상태에서 발생하는 완화진동 주파수 성분을 억압하도록 공진기 길이를 조정하는 방법,<sup>[5]</sup> 비선형 편광기를 이용하여 펄스폭을 압축 및 supermode beating성분을 억압하는 방법,<sup>[6]</sup> two-photon absorption 거울을 사용하여 억압을 supermode beating성분을 억압하는 방법 등이 있다.<sup>[7]</sup>

광통신용 광원으로서 성능을 측정하기 위한 방법으로는 위상잡음, 진폭잡음, 그리고 비트 에러율(bit error rate: BER) 측정이 있다. 일반적으로 위상잡음과 진폭잡음은 고유잡음 측

정기로 측정하는데, 펄스의 스펙트럼을 분석하여 측정하는 방법으로 펄스의 RF 출력 스펙트럼으로부터 SSB(single-sideband) 잡음 스펙트럼을 측정하여 고차 harmonic에서 1차 harmonic을 빼주는 방법,<sup>[8,9]</sup> 수직차 harmonic의 SSB 잡음 스펙트럼만으로 측정하는 방법,<sup>[10]</sup> 펄스의 시간영역에서 전기장 E(t)를 위상과 진폭 성분으로 나누어 계산하는 방법<sup>[11]</sup> 등이 있다. 이러한 모드잠금된 광섬유 레이저에서 BER 측정은 X. Shan에 의해 처음으로 시도되었으며, 이때 고조모드잠금 주파수는 2 GHz이었으며, PRBS(pseudorandom binary sequence) 2<sup>7</sup>-1 bits 신호에 대해 BER  $10^{-9}$ 이었다.<sup>[12]</sup> 그리고, 최근에는 H. Takara에 의해 6.3 GHz로 고조모드잠금된 광섬유 레이저를 출력 안정화하여 PRBS 2<sup>15</sup>-1 bits 신호에 대해 BER  $10^{-10}$ 을 얻었다.<sup>[5]</sup>

실험에 사용된 안정화 방법으로는 ref. [5]를 기초로 하여 설계 및 독립적인 제어를 하였고, 이때 레이저의 출력 스펙트럼으로부터 위상잡음과 진폭잡음 그리고, PRBS 2<sup>23</sup>-1 bits 신호에 대한 BER을 측정해보았다.

### II. 이 론

#### 2.1. 모드잠금 레이저의 완화진동 주파수 성분과 supermode beating 성분

모드잠금된 광섬유 레이저의 공진기 길이는 반도체 레이저의 공진기 길이에 비해서 상대적으로 상당히 길기 때문에 외부의 온도변화나 기계적인 흔들림에 의해 공진기 길이가 민감하게 변화한다. 그래서, 모드잠금 조건에 어긋나게 되면 레이저 발전에 있어서 잡음이 생기게 된다. 이러한 고조모드잠금된 광섬유 레이저에서 나타나는 잡음으로는 크게 완화진동 주파수

\*E-mail: cwjang@korea.ac.kr

(relaxation oscillation frequency) 성분과 supermode beating 성분 두 가지로 나누어 볼 수 있다.

연속발진 레이저는 초기 작동시 외부의 진동 또는 온도 변화의 원인에 의해 공진기의 이득이나 손실에 변화가 생겨 작은 섭동(perturbation)이 레이저에 가해진다. 그래서, 레이저 출력이 갑자기 변했다가 감쇠진동(damped oscillation)을 하면서 원래의 정상상태를 찾는 현상이 있는데, 이를 완화진동(relaxation oscillation)이라고 한다.<sup>11,14)</sup> 이러한 현상은 윌 방정식(rate equation)으로부터 설명될 수 있으며, 광섬유 레이저의 이득매질인 어븀첨가 광섬유(Er<sup>3+</sup>-doped fiber: EDF)로써 3준위 레이저 계를 고려한 윌 방정식을 풀면 완화진동 주파수는 다음과 같이 나타난다.<sup>15,16)</sup>

$$\omega_{relax} = \sqrt{\left(1 + \sigma_c \eta t_c \rho_f N\right) \frac{r-1}{t_2^2 \tau_{c0}} - \frac{1}{2t_2} \left[1 + (1 + \sigma_c \eta t_c \rho_f N)(r-1)\right]^2} \quad (1)$$

여기서,  $N$ 은 이온들의 총 개수이며,  $R$ 은 상위준위로의 펌핑률,  $R_{th}$ 는 문턱 펌핑률이라 하여  $r = R/R_{th}$ 라고 하고,  $t_2$ 는 상위준위 형광수명시간(fluorescence life time),  $\eta = l/nL$ 이고,  $l$ 은 이득매질의 길이,  $L$ 은 공진기 전체 길이,  $n$ 은 굴절률이다. 또한,  $f$ 은 하위준위에서의 열 점유율(fractional thermal occupations),  $\sigma$ 는 천이단면적(transition cross section),  $c$ 는 빛의 속도이다. 여기서,  $t_{c0}$ 는 정상상태에서의 감쇠시간 상수로

$$t_{c0} = \frac{nL}{c a_0} \quad (2)$$

이며,  $a_0$ 는 공진기의 평균손실이다.

supermode beating은 고조모드잠금된 광섬유 레이저에서 수천의 고조모드들이 동시에 발진할 경우, 이들 고조모드들간에 발진 경쟁(lasing competitions)을 하게 되어 고조모드들간에 의한 beating이 일어나게 되는 것이다.<sup>16,17)</sup> 고조모드잠금은 공진기의 길이가 긴 경우 짧은 광펄스를 생성할 수 있지만, 이러한 supermode beating 잠음은 펄스열들을 주파수 영역에서 분석해보면, 고조모드잠금 주파수  $f_m$  주변에 공진기의 기본공진주파수  $f_0$ 의 간격으로 작은 첨두들이 나타난다. 또한 완화진동과 supermode beating 현상이 동시에 발생하는 경우에 레이저로부터 생성된 펄스열들의 에너지 요동이 나타나고, 각 펄스들의 첨두 부분의 폭이 넓게 되는 것으로 알려졌다.<sup>18)</sup>

## 2.2. 펄스레이저의 출력 스펙트럼과 잠음 특성

모드잠금된 레이저의 펄스 신호에 의한 평균출력 세기  $P(t)$ 는 다음과 같다.<sup>19)</sup>

$$P(t) = \frac{P_0}{f_m} [1 + A(t)] \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left[t - \frac{n}{f_m} - J(t)\right] \quad (3)$$

여기서,  $P_0$ 는 레이저 출력의 평균 세기,  $f_m$ 은 펄스의 반복 주파수(pulse repetition frequency),  $A(t)$ 는 펄스의 normalized 진폭잡음(amplitude noise),  $J(t)$ 는 random variable 위상잡음(timing jitter) 성분,  $n$ 은 굴절률이다. 이제 주파수 영역에 대한 스펙트럼  $S_p(f)$ 를 구하기 위해 자기상관 함수에 대한 푸리에 변환을 하여, 펄스의 위상잡음이 상대적으로 작다고 가정

한다면 spectral power density  $S_p(f)$ 는 다음과 같이 된다.

$$S_p(f) \approx P_0^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \{ [1 - (2\pi n f_m \sigma_J)^2] \delta(f - n f_m) + [1 - (2\pi n f_m \sigma_J)^2] S_A(f - n f_m) + (2\pi n f_m)^2 S_J(f - n f_m) \} \quad (4)$$

여기서,  $S_A(f)$ 는 상대적인 진폭잡음 spectral power density,  $S_J(f)$ 는 펄스열의 위상잡음 spectral power density이며,  $\sigma_n$ 는 rms 위상잡음이다. 위의 식으로부터 위상잡음  $S_J(f)$ 는  $n$ 차 harmonics로 감수폭  $n^2$ 에 비례하여 증가하지만  $\sigma_J$ 가 매우 작다고 가정할 때 진폭잡음  $S_A(f)$ 는 일정하게 나타남을 볼 수 있다.

한편,  $L(f)$ 는 SSB 잠음이라 하여 carrier 주파수와 이로부터  $f$ (Hz)만큼 떨어진 위치에서의 잠음의 세기를 비율로 나타낸 것이다.<sup>18)</sup>

$$L(f) = \log \left[ \frac{P(f)}{B P_c} \right], \quad [\text{dBc/Hz}] \quad (5)$$

그러므로, 위의 식으로부터 rms 진폭잡음과 rms 위상잡음은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>19,20)</sup>

$$\sigma_A [f_{low} \sim f_{high}] = \left[ 2 \frac{P_{f_{low} \sim f_{high}}}{P_c} \frac{n^2 L_1(f) - L_2(f)}{n^2 - 1} df \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\sigma_J [f_{low} \sim f_{high}] = \frac{1}{2\pi f_0} \left[ 2 \frac{P_{f_{low} \sim f_{high}}}{P_c} \frac{L_2(f) - L_1(f)}{n^2 - 1} df \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

## III. 실험

### 3.1. 고조모드잠금된 광섬유 레이저의 출력특성

그림 1은 마하젠더 광세기 변조기(optical intensity modulator)를 이용해 10 GHz로 고조모드잠금된 어븀첨가 광섬유 레이저를 이용해, 분산선이 광섬유를 첨가하여 펄스폭을 최적화시켰다.<sup>21,22)</sup> 그리고, 편광변화에 따른 출력요동을 제거하기 위해 공진기 전체를 편광유지 광섬유(polarization maintaining fiber: PMF, panda shape type)를 사용하였다. 여기 광원으로는 4개로 구성된 980 nm의 레이저 다이오드(laser diode: LD)를 사용하였고, 이득매질인 10 m 길이의 편광유지 어븀첨가 광섬유(polarization maintaining Er<sup>3+</sup>-doped fiber: PM EDF)에 여기광을 입사시키기 위해 980/1550 nm 파장 의존 결합기(wavelength division multiplex coupler: WDM coupler)를 결합하였다. 편광유지 분산선이 광섬유(polarization maintaining dispersion shifted fiber: PM DSF, bow tie type)는 펄스폭을 최적화하기 위해 50 m의 길이를 사용하였고, 일반적인 레이저의 출력기용에 해당하는 90:10 광섬유 결합기(90:10 coupler)를 사용하여 레이저의 출력을 얻었다. 광지연선(optical delay line)은 온도에 따른 공진기 길이 변화를 보상해주기 위해 사용하였으며, 모드잠금을 위해 신호 발생기(signal

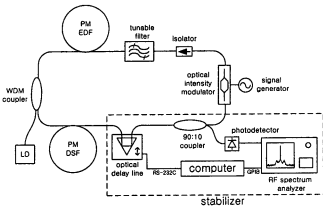


그림 1. 모드잠금된 광섬유 레이저와 안정화장치 구성도.

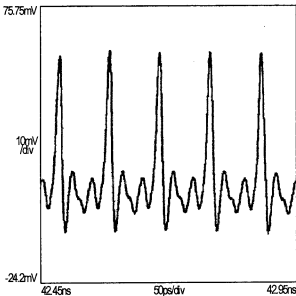


그림 2. 10 GHz 광펄스열.

generator)로 10 GHz의 RF 신호를 마하젠더링  $\text{LiNbO}_3$  광세기 변조기(optical intensity modulator)에 인가하였다. 편광 의존 광도립기(polarization dependent optical isolator)는 공진기 내 단 방향 발진 및 편광기의 역할을 수행하게 되며, 레이저의 발진파장을 선택하기 위하여 1530 nm~1550 nm까지 파장 가변을 할 수 있는 3 nm 투과 대역폭의 가변 필터(tunable filter)를 사용하였다. 이렇게 구성된 광섬유 레이저는 공진기의 길이가 약 71 m로 기본공진주파수  $f_0$ 는 2.722 MHz로 측정되었으며, 이에 따른 공진기의 전체 광학적 길이는 81 m이다. 그래서 10 GHz의 반복률을 가진 펄스를 얻기 위하여, 신호발생기로 기본공진주파수의 3672번째 조화주파수에 해당하는 9.997640 GHz의 주파수를 광세기 변조기에 인가하였다.

1550 nm의 파장 대역에서 10 GHz로 고조모드잠금된 광섬유 레이저의 광펄스열, 광스펙트럼, 광펄스폭을 각각 그림 2, 3, 4에 나타내었다. 그림 2로부터 펄스열이 조화 주파수 10 GHz에 해당하는 100 psec의 간격으로 펄스열을 형성하고 있음을 볼

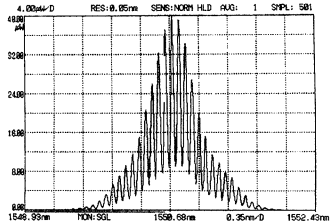


그림 3. 레이저 출력의 광스펙트럼.

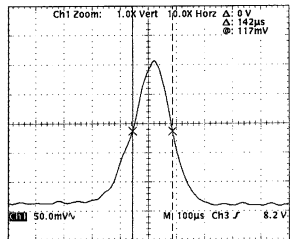


그림 4. 자기상관에 의한 펄스폭 4 psec.

수 있다. 그림 3은 광스펙트럼으로 10 GHz의 반복률에 해당하는 0.08 nm의 횡모드 간격을 가지며, 자기상관기로부터 측정 한 가우시안 형태의 펄스폭은 4 psec로 그림 4에 나타내었다.

### 3.2. 안정화 되먹임 제어 및 특성

모드잠금된 광섬유 레이저 출력의 잠음특성을 분석하기 위해, 주파수 디튜닝(detuning)하여 모드잠금조건이 어긋나게 되면 이때 발생하는 완화진동 주파수 성분과 supermode beating 주파수 성분을 측정하여 비교 분석하였다. 그림 5는 레이저의 출력을 45 GHz 대역폭의 광검출기로 입력을 받아 RF 스펙트럼 분석기(Anritsu MS2668C)로 완화진동과 supermode beating에 해당하는 주파수 성분의 크기를 측정한 스펙트럼 결과이다. 그림에서의 완화진동 성분은 RF 스펙트럼 분석기의 bandwidth를 80 kHz로 고정시켜 주파수 디튜닝에 따라 발생하는 잠음의 크기를 나타낸 것이며, supermode beating 성분은 주파수 디튜닝에 따라 중심주파수 주변에 레이저 공진기의 기본공진주파수 간격(2.7 MHz)으로 발생하는 새로운 주파수 성분의 크기를 나타낸 것이다. 여기에서 볼 수 있듯이 완화진동 주파수 성분이 출력 불안정성에 보다 민감하게 반응함을 볼 수 있다.

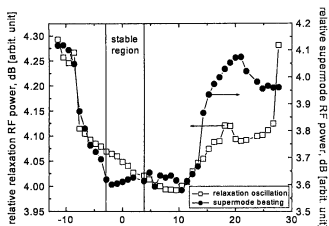


그림 5. 디튜닝 주파수에 따른 완화진동 주파수 성분과 supermode beating 성분의 power.

이로부터 출력 불안정성이 발생하였을 때 완화진동 주파수 성분을 억압하도록 공진기 길이를 조정하는 방법을 사용하여 모드잠금된 광섬유 레이저를 안정화하였다. 그림 1에 모드잠금된 광섬유 레이저의 출력안정화 장치를 나타내었다. 레이저의 출력은 45 GHz 광검출기로 입력받아 40 GHz RF 스펙트럼 분석기로 보낸다. 그리고, RF 스펙트럼 분석기는 완화진동 주파수 성분의 크기 변화를 실시간으로 컴퓨터에 보내게 된다. 이때, 고조모드 잠금이 어긋나게 되면 완화진동 주파수 성분의 크기가 커지게 되므로 광지연로의 길이를 변화시켜 전체 공진기의 길이가 일정하게 유지되도록 피드백 제어를 하였다. 여기에 사용된 RF 스펙트럼 분석기와 광지연로는 각각 GPIB(IEEE 488.2)와 serial port(RS-232C)로 컴퓨터에 연결되어 제어하였으며, 사용된 소프트웨어는 LabVIEW이다. 또한, 완화진동 주파수 성분은 사용된 어긋판의 세기에 따라 62 kHz 이내에서만 발생하므로, 200 kHz의 대역폭을 갖는 광검출기와 데이터 수집 속도가 빠른 AD converter(National Instruments PCI-6024E; 수집속도 200 kS/s)만을 사용하여 레이저의 출력을 안정화시킬 수 있었다. 앞에서 제안한 안정화

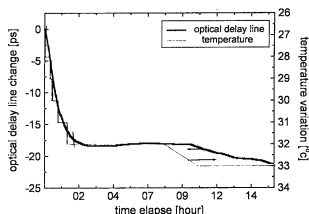


그림 7. 출력 안정화를 시켰을 때의 광지연로의 길이와 온도변화.

방법으로 16시간 이상 안정된 출력을 얻을 수 있었다. 그림 6은 안정화에 의한 BER 측정결과로 PRBS 2<sup>23</sup>-1 bits 신호에 대해 10<sup>-13</sup>으로 측정되었다.

그림 7은 안정화가 진행되는 동안의 광지연로의 길이 변화를 나타낸 것으로, 시간이 경과함에 따라 광지연로의 길이가 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이는 모드잠금된 광섬유 레이저의 구성기 내부온도가 증가하기 때문에 안정화 제어에 의해 광섬유로 구성된 공진기의 길이가 늘어난 것으로 해석할 수 있다. 즉, 출력안정화를 위해 공진기의 길이를 일정하게 유지될 수 있게 광지연로의 길이를 조정하는 것이다. 그리고, 그림 7의 오른쪽 y축은 안정화되는 동안 모드잠금된 광섬유 레이저의 구성기 내부 온도를 나타낸 것으로 실험결과는 점선으로 나타내었다. 광지연로의 변화 기술기와 공진기 구성 내부 온도의 변화 기술기의 정도가 거의 일치하며, 이로부터 레이저 공진기의 전체 선 팽창계수  $1.4 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 를 간접적으로 구할 수 있다.

### 3.3. 잡음특성

모드잠금된 광섬유 레이저의 잡음 특성인 위상잡음과 진폭잡음을 측정해 보았다. 그림 8은 레이저의 광출력을 RF 스펙트럼 분석기로 각각의 harmonics에 따른 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이때 스펙트럼의 bandwidth와 분해능(resolution bandwidth, RBW)은 각각 400 kHz, 1 kHz이다. 2.2. 절에서 언급하였듯이 위상잡음에 의해 n차 harmonics로 갈수록 스펙트럼의 baseline이 상승되는 것을 볼 수 있으며, 약 54 kHz 부근에서 발생하는 잡음을 완화진동 주파수 성분이라 한다.

일반적으로 위상잡음을 측정하기 위해 중심차 harmonics 스펙트럼만으로 구할 수 있다. 그러나, 본 실험에 사용된 스펙트럼 분석기의 주파수 대역폭이 40 GHz 한계에 의하여 측정 가능한 최대 harmonic인 4차 harmonic과 1차 harmonic의 스펙트럼을 식 (5-7)에 대입하여 rms 위상잡음과 rms 진폭잡음을 측정하였다.

그림 9는 1차와 4차 harmonic의 주파수 offset에 따른 SSB 잡음 스펙트럼 결과이며, 이로부터 고조모드잠금된 광섬유 레이저의 rms 위상잡음과 rms 진폭잡음은 각각 524 fsec과 11.5%

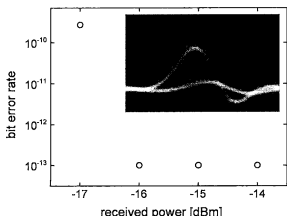


그림 6. 입력세기에 따른 BER과 eye-diagram.

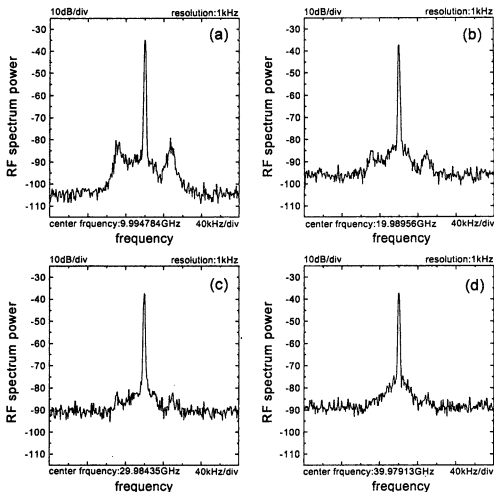


그림 8. 레이저의 출력 스펙트럼. (a) 중심주파수 10 GHz, (b) 중심주파수 20 GHz, (c) 중심주파수 30 GHz, (d) 중심주파수 40 GHz.

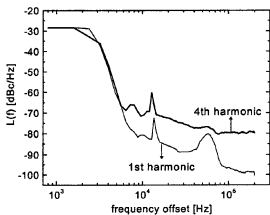


그림 9. SSB 잠음 스펙트럼.

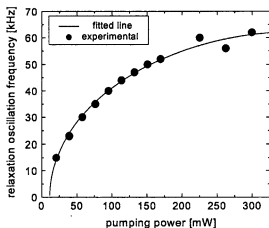


그림 10. 입력 여기광원의 세기에 따른 완화진동 주파수.

로 나타났다. 같은 방법으로 인정되는 동안의 rms 위상잡음과 rms 진폭잡음은 260 fsec-524 fsec와 4-11.5%의 사이에 분포하였다. 그림 10은 여기광원의 세기에 따른 측정된 완화진동 주파수의 변화로 식 (1)으로 곡선맞춤을 해보았다. 이때 사용된 어븀철가 광섬유의 10 m 길이에 대한 상준위 형광수명시간은 8.4 msec라고 할 때,<sup>[23]</sup> 곡선맞춤 결과 여기광원의 문턱 세

기는 11.4 mW, 감쇠시간 상수  $t_{c0}$ 는  $2.55 \times 10^{-6}$  msec로 나타났다. 또한, 감쇠시간과 공진기 손실의 관계는 식 (2)에 의해

$$\text{cold cavity loss} = 10 \log \left( 1 - e^{-\frac{nL}{ct_0}} \right) \quad (8)$$

와 같이 나타나며, 이로부터 공진기 전체 손실은 약 8.5 dB로 계산되었다.

#### IV. 결 론

본산이 보상되고 10 GHz로 고조모드잠금된 광섬유 레이저의 완화진동 주파수 성분이 억압되도록 되먹임 제어를 이용하여 출력을 안정화시켰으며 안정도를 측정하는 연구를 하였다. 실험에 사용된 여기광원의 출력범위 내에서 모드잠금된 광섬유 레이저의 완화진동 주파수는 15-62 kHz로 측정되었다. 이때, 어블침가 광섬유의 음방정성으로부터 완화진동 주파수 합수를 구하여 곡선맞출한 결과 입력여기광원의 문턱 세기는 11.4 mW, 공진기 전체 손실 8.5 dB를 구할 수 있었다.

모드잠금된 광섬유 레이저의 안정화를 위해 완화진동 주파수 성분이 억압되도록 광지연로를 조절하여 전체 공진기 길이 가 일정하게 유지되는 되먹임 제어를 하여 16시간 이상 안정된 펄스를 얻을 수 있었다. 그리고, 안정화 제어에 사용된 완화진동 주파수 성분이 62 kHz 이내로 발생하기 때문에, RF 스펙트럼 분석기 없이도 200 kHz 광검출기와 AD converter가 내장된 컴퓨터만으로 안정화 되먹임 제어하여 안정된 출력을 얻을 수 있었다. 이때, 안정화 되먹임 제어에 의해 측정된 rms 위상잡음과 rms 진폭잡음은 각각 260-524 fsec, 4-11.5%의 사이에 분포하였으며, 신호대 잡음비는 >47 dB이고, BER은 PBR5 2<sup>23</sup>-1 신호에 대해 10<sup>-12</sup>으로 측정되었다.

앞으로의 연구방향은 광지연로의 지연길이를 보다 정밀하게 조절 가능하게 하여, 모드잠금된 광섬유 레이저의 위상잡음과 진폭잡음이 최소화되도록 진행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 실험에 사용된 모드잠금된 광섬유 레이저의 BER 측정용 도와주신 서울대학교의 박남규 교수님과 윤희성님께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 신상영 외 8인 공저, 초고속 광통신 기술(홍릉과학출판사, 1997), 제 15장.
- [2] H. A. Haus and Y. Silberberg, "Laser mode locking with addition of nonlinear index," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 325-331, 1986.
- [3] H. A. Haus, J. G. Fujimoto, and E. P. Ippen, "Structures for additive pulse mode locking," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 8, no. 10, pp. 2068-2077, 1991.
- [4] H. A. Haus, K. Tamura, L. E. Nelson, and E. P. Ippen, "Stretched-pulse additive pulse mode-locking in fiber ring lasers: theory and experiment," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, no. 3, pp. 591-598, 1995.
- [5] H. Takara, S. Kawanishi, and M. Saruwatari, "Highly stable, actively mode-locked Er-doped fiber laser utilizing relaxation oscillation as detuning monitor," *IEICE Trans. Electron.*,

- vol. E81-C, no. 2, pp. 213-220, 1998.
- [6] L. Yuhua, L. Caiyun, W. Jian, W. Boyu, and G. Yizhi, "Novel method to simultaneously compress pulses and suppress supermode noise in actively mode-locked fiber ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 9, pp. 1250-1252, 1998.
- [7] E. R. Thoen, M. E. Grein, E. M. Koontz, E. P. Ippen, H. A. Haus, and L. A. Kolodziejski, "Stabilization of an active harmonically mode-locked fiber laser using two-photon absorption," *Optics Lett.*, vol. 25, no. 13, pp. 948-950, 2000.
- [8] A. Finch, X. Zhu, P. N. Kean, and W. Sibbett, "Noise characterization of mode-locked color-center laser sources," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 6, pp. 1115-1123, 1990.
- [9] A. Rahwanto, Y. Matsuo, N. Nishizawa, T. Goto, M. Mori, H. Mizuchi, and K. Yamane, "Noise characteristics of amplitude modulated harmonically mode-locked Er-doped fiber ring lasers" in *APCC/OECC '99. Fifth Asia-Pacific Conference on Communication and Fourth Optoelectronics and Communications Conference*, vol. 2, pp. 1524-1526, 1999.
- [10] M. J. W. Rodwell, D. M. Bloom, and K. J. Weingarten, "Subpicosecond laser timing stabilization," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 4, pp. 817-827, 1989.
- [11] O. Pottiez, O. Deparis, R. Kiyani, P. Megret, and M. Blondel, "Comparison of two techniques for measuring amplitude and phase noises of gigahertz pulse train from actively mode-locked Er-doped fiber laser" in *LEOS 2000, 13th Annual Meeting, IEEE*, vol. 2, pp. 772-773, 2000.
- [12] X. Shan, D. Cleland, and A. Ellis, "Stabilising Er fibre soliton laser with pulse phase locking," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 2, pp. 182-184, 1992.
- [13] A. E. Siegman, *Lasers* (Oxford University Press, Oxford, 1956), Chapter 25.
- [14] A. Yariv, *Quantum Electronics*, 3rd ed., (John Wiley & Sons, New York, 1998), Chapter 20.
- [15] O. G. Okhotnikov, V. V. Kuzmin, and J. R. Salcedo, "General intracavity method for laser transition characterization by relaxation oscillations spectral analysis," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 362-364, 1994.
- [16] N. Onodera, "Supermode beat suppression in harmonically mode-locked erbium-doped fiber ring lasers with composite cavity structure," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 11, pp. 962-963, 1997.
- [17] M. Nakazawa, K. Tamura, and E. Yoshida, "Supermode noise suppression in a harmonically mode-locked fiber laser by self-phase modulation and spectral filtering," *Electron. Lett.*, vol. 32, no.5, pp. 461-463, 1996.
- [18] Y. D. Golyaev and S. V. Lantratov, *Sov. J. Quantum Electron.*, vol. 13, p. 580, 1983.
- [19] K. K. Gupta, D. Novak, and H.-F. Liu, "Noise characterization of a regeneratively mode-locked fiber ring laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, no. 1, pp. 70-78, 2000.
- [20] "Understanding and measuring phase noise in the frequency domain," Hewlett-Packard Application note, no. 207, 1976.

- [21] 이유승, 전영민, 김동환, 장지웅, 조윤주, 이 석, 조규만, "10 GHz로 고조모드록킹된 고리형 어블럼가 광섬유 레이저의 이론적 해석 및 향상된 공진기 설계," 한국광학회지, 제 11 권 5호, pp. 353-359, 2000.
- [22] 이유승, 전영민, 김동환, 이 석, 장지웅, 조규만, 제12회 정기총회 및 2001년도 동계학술발표회, 한국광학회, 서울, 2001, pp. 214-215.
- [23] B. K. Kim, Y. M. Jhon, M.-W. Kim, J. C. Lee, S. K. Kim and S. S. Choi, "Cavity loss measurement from the relaxation oscillation frequency," in CLEO Pacific Rim '99, vol 2, pp. 481-482, 1999.

**Stabilization and characterization of a 10 GHz harmonically mode-locked Er-doped fiber ring laser by suppression of relaxation oscillation**

Chi Woong Jang<sup>†</sup>, Yoo Seung Lee, and Young Min Jhon

*Photonics Research Center, KIST, Seoul 136-791, KOREA*

*<sup>†</sup>E-mail: cwjang@korea.ac.kr*

Tong Kun Lim

*Department of Physics, Korea University, Seoul 136-701, KOREA*

(Received September 24, 2001 ; revised manuscript received January 17, 2002)

Using Mach-Zehnder type intensity modulator, we stabilized a 10 GHz harmonically mode-locked dispersion-compensated fiber ring laser using a feedback controlling system, and we measured its stability. The laser was stabilized for more than 16 hours by controlling the cavity length to suppress the relaxation oscillation frequency component which had caused the laser output instability. The rms timing jitter and rms amplitude noise were measured to be 260~524 fsec and 4~11.5%, respectively, and BER test measurement showed a value of  $10^{-13}$ .

*Classification codes* : FO.020, LO.030, LO.090.