

편광유지 광섬유로 구성된 10 GHz 파장가변 모드록킹 광섬유 고리형 레이저 제작 및 특성연구

김봉규 · 김명욱 · 전영민 · 이정찬 · 김상국 · 최상삼

서울시 성북구 하월곡동 39-1
한국과학기술연구원 광기술연구센터

(1998년 6월 27일 받음, 1998년 7월 29일 수정본 받음)

본 연구에서는 능동형 모드록킹 방식을 이용하여 10 GHz의 고반복률을 가지는 초단펄스 광섬유 고리형 레이저를 제작하였다. 레이저 공진기의 모든 부분을 편광유지 광섬유로 구성하여 편광변화에 의한 불안정성이 없는 비교적 안정된 펄스를 얻을 수 있었으며, 투과 대역폭 2.4 nm의 파장가변 필터를 공진기 내부에 삽입하여 발진파장을 1530 nm에서 1560 nm 까지 조절할 수 있었고, 0.4 nm 파장 선평폭과 8 psec 펄스폭, 그리고 1.2 mW 평균출력을 갖는 펄스를 발생시킬 수 있었다. 또한, 여기 광의 세기에 따른 relaxation oscillation 주파수 변화를 측정함으로써 레이저 공진기의 손실을 알 수 있는 방법을 제안하였다.

I. 서 론

고반복률, 짧은 펄스폭 그리고 고출력을 가진 펄스형 광원은 광통신 및 광계측에 매우 유용하다. 일반적으로 광섬유형 모드록킹 레이저는 수십 GHz의 반복률, 수 picosecond의 펄스폭, 수 mW의 출력 특성을 가지고 있으며, 광통신 시스템 또는 광계측 장비들과 결합이 용이하기 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1-4] 펄스폭, 안정도, 반복률은 초단펄스형 광원의 특성을 나타내는 중요한 척도가 된다. 펄스폭에 관한 연구로는 공진기를 구성하는 광섬유의 분산 효과,^[2] 비정상적 분산을 이용한 솔리톤 효과^[3] 등에 관한 연구가 있고, 고반복률에 대한 연구로는 유리차수 모드록킹의 특성조사^[4] 등이 있다. 그리고, 안정도를 좋게 하는 방법으로는 공진기 내부에 필터를 넣는 방법,^[5] 수십 kHz 주파수로 공진기의 길이를 변화시키는 방법,^[6] relaxation oscillation 주파수를 이용하여 안정성을 향상시키는 방법^[7] 등이 있다.

레이저에서 극초단 펄스를 발생시키는 방식으로는 수동형 모드록킹과 능동형 모드록킹이 있다. 수동형 모드록킹 방법은 짧은 펄스폭을 갖는 펄스를 발생시킬 수 있지만 timing jitter가 크고 반복성을 조절하기가 어렵다. 이에 반해 능동형 모드록킹은 수동형 모드록킹에 비해 상대적으로 펄스폭은 넓지만, 안정된 출력과 고반복률을 가진 펄스를 발생시킨다. 따라서, 고반복률을 가진 안정된 펄스를 발생시키기 위한 광원에서는 능동형 모드록킹 방법이 많이 사용된다. 또한, 선형 공진기 구조를 갖는 광섬유 레이저는 정상파에 의한 hole burning 효과에 의하여 잡음이 발생하기 때문에, 정상파가 생기지 않는 고리형 구조의 공진기 형태가 주로 사용된다. 그리고, 능동형 모드록킹 방식으로 광섬유 고리형 레이저로 펄스가 발생되어도 공진기가 일반 광섬유로 구성되어 있으면, 공진기를 진행하는 빛의 편광상태는 외부의 영향에 의하여 쉽게 변화되어 출력이 매우 불안정하게 된다. 이러한 편광에 의한 출력 불안정을 없애기 위하여 레이저 공진기의 모든 부분을 편광유지

광섬유로 구성하여 펄스를 발생시킨다.^[8]

본 연구에서는 공진기의 모든 부분을 편광유지 광섬유로 구성된 광섬유 고리형 레이저를 제작하여 능동형 모드록킹 방식으로 비교적 안정된 출력을 갖는 고반복률 초단펄스를 발생시켰다. 모드록킹이 일어나게 하기 위하여 리튬나이오베이트 광세기 변조기를 사용하였고, 투과 대역폭이 2.4 nm인 가변필터를 사용하여 레이저의 중심 파장을 1530~1560 nm 사이에서 조절할 수 있도록 하였다. 레이저의 광 변조기에 10 GHz의 rf 신호를 인가하여, 8 psec의 펄스폭과 1.2 mW의 평균출력을 갖는 펄스를 얻을 수 있었다.

한편, 초단펄스 광원에서 펄스폭의 중요한 변수중 하나인 공진기의 손실을 relaxation oscillation 주파수를 이용하여 측정하는 방법을 제안하였다. 현재까지는 레이저를 제작한 상태에서 공진기의 손실을 측정하는 방법이란 거의 불가능하였다. 비록, 출력의 세기를 조절할 수 있는 레이저에서 출력부분의 결합비율과 레이저의 문턱세기의 크기의 관계를 이용하여 공진기의 손실을 측정하는 방법이 있으나,^[9] 이 방법은 결합비율을 조절할 수 있는 광 결합기가 필요하기 때문에 실용적으로 사용하기가 힘들뿐만 아니라 외부환경으로 인하여 출력의 변화가 있을 수 있는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 여기 광의 세기에 따른 relaxation oscillation 주파수의 변화를 관측하여 레이저의 문턱세기와 공진기의 손실을 알 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 공진기의 손실측정 방법은 초단펄스형 광원의 특성을 연구하는데 매우 유용하게 사용될 것이다.

II. 모드록킹 광섬유 레이저

그림 1은 초단펄스를 발생시키기 위한 모드록킹 광섬유 고리형 레이저의 구성도이다. 편광변화에 의한 출력의 변화를 없애기 위하여 공진기를 구성하는 모든 부분을 편광유지 광섬유와 편광유지 광섬유가 접합되어 있는 광소자들로 제작하였다. 이득매질로는 길이 10 m의 어븀첨가 편광유지 광섬유

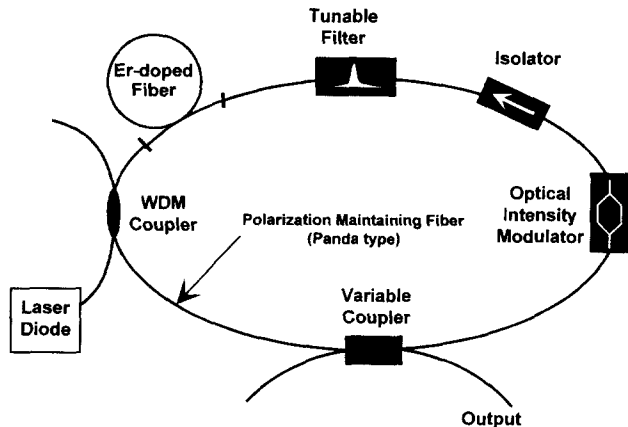


그림 1. 공진기가 편광유지 광섬유로 구성된 모드록킹 고리형 광섬유 초단펄스 레이저의 구성도.

를 사용하였으며, 또한, 모드록커로는 리튬나이오베이트 광세기 변조기, 한 방향 발진 및 한 개의 편광만 발진하도록 하기 위하여 편광의존 광굴절기를 사용하였다. 그리고, 레이저의 발진파장을 조절할 수 있도록 중심파장을 1530 nm에서 1560 nm 사이에서 변화시킬 수 있는 투과 대역폭 2.4 nm의 가변필터를 사용하였고, 레이저의 출력을 조절할 수 있도록 결합비율을 0~100%로 조절할 수 있는 결합비율 가변형 광섬유 결합기를 사용하였다. 여기광원으로는 파장 980 nm의 레이저 다이오드를 사용하였으며, 편광유지 광섬유로 제작된 980/1550 nm WDM 결합기를 통하여 이득매질로 사용되는 어븀 첨가 광섬유에 여기광을 입사시켰다. 파장가변 필터를 조절하여 레이저의 발진파장을 1530 nm에서 1560 nm 까지 조절하였다. 레이저의 기본 모드록킹 주파수는 8.954 MHz로 측정되었으며, 이는 어븀첨가 광섬유를 포함한 공진기의 전체 길이가 약 23 m인 것과 잘 일치하였다.

모드록커로 사용된 리튬나이오베이트 광세기 변조기는 마하젠더 간섭계형태로 구성되어 있으며, 약 30 dB의 extinction ratio, 10 MHz 영역에서 3.6 Vpeak-peak(14 dBm)의 반파 전압(half wave voltage), 그리고, 9.8 GHz의 대역폭의 특성을 가졌다. 따라서, 10 GHz 주파수의 신호에서는 반파 전압의 세기는 7.2 Vpeak-peak가 된다. 10 GHz의 반복률을 가진 펄스를 얻기 위하여, 신호발생기(Wiltron, 68033B)를 사용하여 기본 모드록킹 주파수의 1117번째 조화주파수인 10.00 GHz의 주파수, 약 7 Vpeak-peak의 전압을 갖는 rf 신호를 광 변조기에 인가하였다. 출력되는 광 펄스들을 대역폭이 45 GHz인 광 검출기(New Focus Inc., 1014)와 50 GHz인 오실로스코프(Tektroniks, CSA803A)를 사용하여 측정한 결과는 그림 2와 같다. 펄스들 사이의 간격은 100 psec로 10 GHz 반복률을 가진 펄스들이 출력됨을 나타내었다.

광 검출기와 오실로스코프만을 이용한 펄스폭 측정은 분해능의 한계 때문에 짧은 펄스폭을 갖는 펄스를 측정하기 어렵다. 따라서, 좀더 정확한 펄스폭을 측정하기 위하여 autocorrelator(Femtochrome, FR-103XL)를 사용하였다. 분해능이 1 psec인 autocorrelator와 오실로스코프를 사용하여 펄스폭 및 펄스의 모양을 측정한 결과는 그림 3과 같다. 펄스의

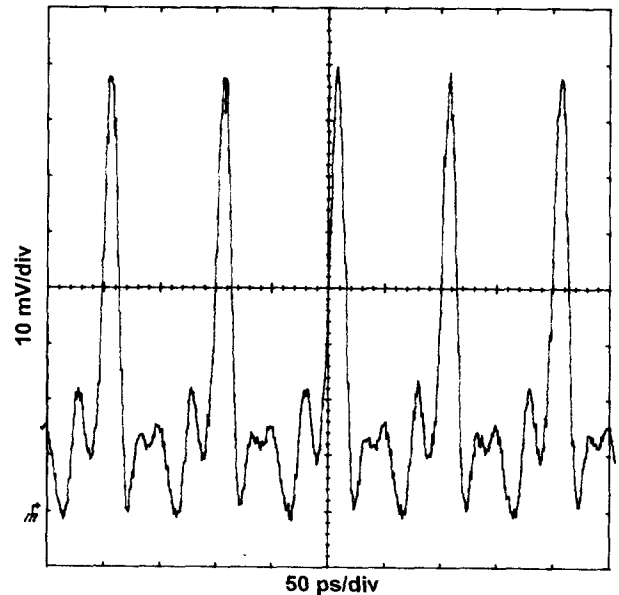


그림 2. 광섬유 레이저에서 출력되는 10.0 GHz 반복률을 갖는 펄스열 모양.

모양을 가우시안 함수와 비교하여 보았을 때 매우 잘 일치하였으며, 반치폭은 350 μ sec였다. Autocorrelator에서 출력되는 신호와 실제시간 사이의 변환계수는 34 psec/msec이고, 펄스의 모양이 가우시안이기 때문에, 실제 펄스의 반치폭은 8 psec이다. 이때 출력되는 레이저의 평균출력은 1.2 mW였으며, 펄스의 최대 출력은 약 15 mW로 추정된다.

펄스폭 측정과 동시에 광 스펙트럼을 측정하였다. 그 결과는 그림 4와 같다. 이때 광 스펙트럼 분석기의 분해능은 0.05 nm이고, 측정된 레이저 출력의 반치 파장 선폭은 0.43 nm였다. 펄스폭과 파장 선폭의 곱($\Delta\tau \cdot \Delta\nu$)은 0.43으로 푸리에변환 한계값에 가까웠고, 따라서, 레이저는 처핑이 거의 없음을 알 수 있었다. 그리고, 넓은 선폭을 갖는 광 스펙트럼 내에 짧은

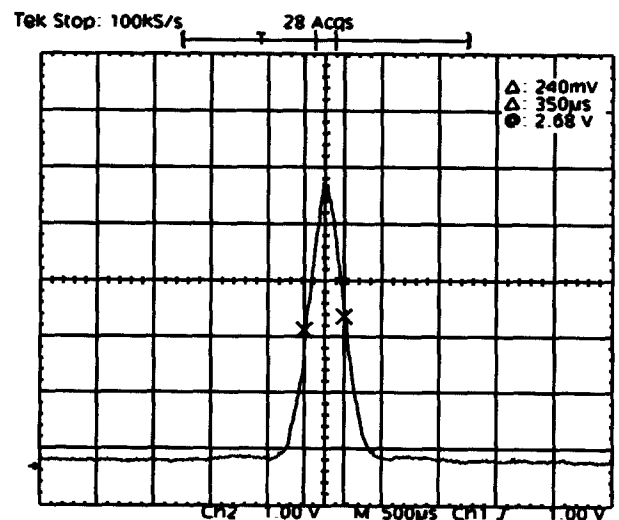


그림 3. Autocorrelator로 측정된 펄스의 모양 (시간변환계수 : 34 psec/msec, 펄스폭 : 8 psec).

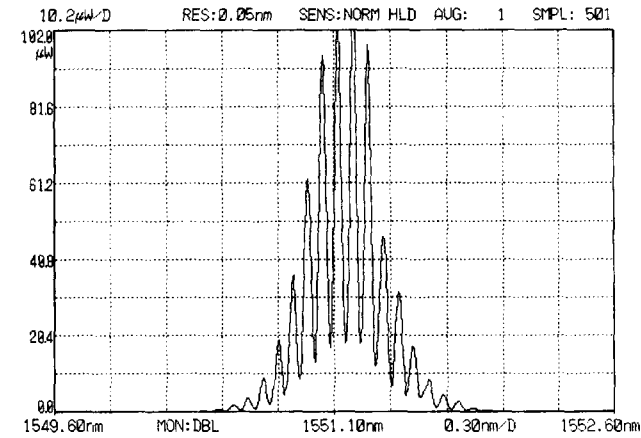


그림 4. 10 GHz 반복률과 8 psec 펄스폭을 갖는 펄스가 출력될 때 광 스펙트럼모양.

선폭을 갖는 미세구조의 스펙트럼들이 0.08 nm의 간격으로 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 이는 모드록킹 주파수인 10 GHz와 잘 일치하였다. 따라서, 모드록킹 레이저에서 10 GHz 펄스 신호가 안정적으로 출력됨을 알 수 있었다. 그러나, 이러한 레이저는 장시간 작동할 경우 외부 환경변화로 인한 공진기의 길이의 변화에 의하여 출력이 불안정하다. 이러한 불안정성을 레이저 공진기의 길이를 능동적으로 제어하는 방법으로 감쇄시켜 안정된 출력을 얻을 수 있다.¹⁷⁾

III. Relaxation Oscillation을 이용한 공진기의 손실측정

모드록킹된 초단펄스 레이저에서 중요한 특성 중의 하나인 광 펄스폭은 공진기의 손실, 광 변조기의 변조진폭과 변조주파수, 그리고 파장필터의 투과대역폭(또는 이득매질의 파장선폭)에 의해 결정이 된다.¹⁰⁾ 이중 변조진폭, 변조주파수 그리고 파장필터의 투과 대역폭은 쉽게 측정이 가능하지만, 공진기의 손실은 측정하기 어렵다. 따라서, 초단펄스 레이저에서 공진기의 손실 측정은 매우 중요한 연구가 될 수 있다. 본 연구에서는 레이저가 외부의 영향에 의해 섭동이 있으면 생기는 relaxation oscillation의 주파수를 관측하여 완성된 레이저 공진기의 손실을 측정하는 방법을 제안하였다.

레이저의 relaxation oscillation 주파수 f_r 은 이득매질의 특성과 공진기 특성에 의하여 결정이 되며, 다음과 같이 나타낸다.¹¹⁾

$$f_r = 2\pi \left[\frac{r-1}{\tau_2 \tau_c} - \left(\frac{r}{2\tau_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, $\tau_c = \frac{-nL}{c \ln T}$.

τ_2 는 이득매질의 상위준위의 평균수명(lifetime)이고, r 은 여기비율(pumping rate)로서 여기광의 세기 P_p 와 레이저 문턱세기 P_{th} (threshold power)의 비율(P_p/P_{th})로 표시된다. 한편, τ_c 는 공진기의 평균수명으로서, 광섬유의 굴절률 n , 공진기의 전체 길이 L , 빛의 속도 c , 그리고 빛이 공진기를 한바퀴 돌았을 때

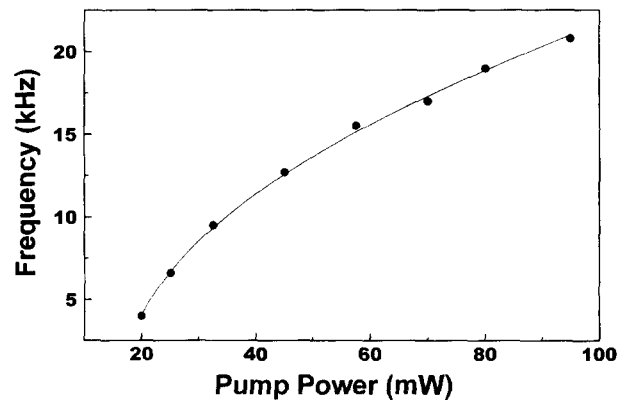


그림 5. 여기광의 세기 변화에 따른 relaxation oscillation 주파수의 변화특성.

투과율 T 로 표시된다. 따라서, 여기광의 세기에 따른 relaxation oscillation 주파수의 관계로부터 공진기에서의 손실 $(1-T)$ 과 레이저의 문턱세기를 얻을 수 있다.

Relaxation oscillation이 지속적으로 일어나게 하기 위하여, 광섬유 고리형 레이저의 광 변조기에 기본 모드록킹 주파수와 약간 다른 8.955 MHz의 주파수를 갖는 rf 신호를 인가하였다. 45 GHz 광 검출기와 rf 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정된 여기광의 세기에 따른 레이저의 relaxation oscillation 주파수 변화는 그림 5와 같다. 여기서, 여기광의 세기는 WDM 결합기에 입사되기 전의 980 nm 레이저 다이오드에서 출력되는 빛의 세기이며, 수식 (1)에서 살펴보았듯이 주파수 f_r 이 여기비율에만 관계되기 때문에, 여기광의 세기의 절대값을 알아야 할 필요는 없다. 공진기의 손실을 계산할 때 필요한 어븀의 상위준위의 평균수명은 8.4 msec로 측정되었다. 레이저 문턱세기 P_{th} 가 16 mW이고, 공진기의 평균수명 τ_c 가 3.8×10^{-8} sec일 때, 여기광의 세기에 따른 relaxation oscillation 주파수의 변화 곡선은 실선으로 표시되었고, 측정된 결과와 가장 잘 일치하였다. 공진기의 투과율 T 는 수식 (1)을 이용하여 얻을 수 있으며, 이때 $c/(nL)$ 은 기본 모드록킹 주파수 8.954 MHz에 해당이 된다. 계산된 투과율 T 는 0.03으로, 구해진 공진기의 손실은 15 dB였다. 공진기를 구성하는 각각의 광소자들의 손실을 살펴보면, 광변조기 4 dB, 가변형 방향성 결합기 2 dB, 어븀첨가 광섬유와 편광유지 광섬유사이의 결합손실 2 dB×2, 가변형 파장필터 1 dB, 광섬유 고립기 0.5 dB, WDM 결합기 0.5 dB, 용융결합 7군데 7×0.1 dB, 그리고 광섬유 커넥터 1.5 dB×2로 공진기의 전체 손실은 약 14-16 dB 정도로 추정된다. Relaxation oscillation 주파수를 측정하여 구해진 공진기의 손실은 14-16 dB의 추정손실과 잘 일치하였다.

IV. 결 론

본 실험에서는 공진기의 모든 부분을 편광유지 광섬유로 구성된 광섬유 고리형 레이저를 제작하여 능동형 모드록킹 방식으로 비교적 안정된 출력을 갖는 고반복률 초단펄스를 발생시켰다. 투과 대역폭 2.4 nm인 가변필터를 공진기 내부에 설치하여 1530 nm에서 1560 nm사이에서 중심파장을 가

변할 수 있었다. 제작된 레이저에서 출력되는 펄스는 10 GHz 반복률, 8 psec의 짧은 펄스폭 그리고 1.2 mW 평균출력의 특성을 가졌다. 또한, 여기광의 세기에 따른 relaxation oscillation 주파수의 변화를 관측하여 레이저 공진기의 손실을 구하는 방법을 제안하였으며, 이 방법으로 구해진 공진기의 손실은 15 dB로 추정손실 14-16 dB과 잘 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부의 일부 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] M. Saruwatari, IEICE Trans. Commun., **E78-B**, 635 (1995).
- [2] L. E. Nelson, D. J. Jones, K. Tamura, H. A. Haus and E. P. Ippen, Applied Physics B, **65**, 277 (1997).
- [3] D. Foursa, P. Emplit, R. Leners and L. Meuleman, Electron. Lett., **33**, 486 (1997).
- [4] M. Y. Jeon, *et al.*, J. Opt. Soc. Korea, **2**, 9 (1998).
- [5] M. Nakazawa, K. Tamura and E. Yoshida, Electron. Lett., **32**, 461 (1996).
- [6] X. Shan and D. M. Spirit, Electron. Lett., **29**, 979 (1993).
- [7] H. Takara, S. Kawanishi and M. Saruwatari, Electron. Lett., **31**, 292 (1995).
- [8] M. Nakazawa, E. Yoshida and K. Tamura, Electron. Lett., **32**, 1285 (1996).
- [9] D. Findlay and R. A. Clay, Phys. Lett., **20**, 277 (1966).
- [10] A. E. Siegman, *Lasers*, (Oxford University Press, 1986), pp. 1061.
- [11] A. Yariv, *Optical Electronics*, 3rd edition, (Holt Saunders, 1985), pp. 188.

10 GHz wavelength tunable mode-locked fiber ring laser configured with all polarization maintaining fiber

Bong Kyu Kim, Myong-Wook Kim, Young Min Jhon, Jyung Chan Lee,
Sang Kuk Kim and Sang Sam Choi
*Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology
39-1 Hawolkok-dong Seongbuk-ku, Seoul, Korea*

(Received June 27, 1998, Revised manuscript received July 29, 1998)

We have demonstrated the wavelength tunable ultrashort pulse fiber ring laser and proposed the novel method for measuring the cavity loss from relaxation oscillation frequency and the pump power. To suppress the polarization instability the laser cavity is configured with polarization maintaining fibers and to control the center wavelength a 2.4 nm bandwidth tunable wavelength filter was inserted in the cavity. The laser has 8 picosecond pulse width, 10 GHz repetition rate and 1.2 mW average power in 1530-1560 nm operation range.