

광섬유 패브리-페로 파장가변 필터의 공진특성에 기반한 고속 파장가변 모드잠김 레이저의 제작

논문
58-7-20

Construction of High-Speed Wavelength Swept Mode-Locked Laser Based on Oscillation Characteristics of Fiber Fabry-Perot Tunable Filter

이 용 제* · 김 용 평†
(Eung-Je Lee · Yong-Pyung Kim)

Abstract - A high-speed wavelength swept laser, which is based on oscillation characteristics of a fiber Fabry-Perot tunable filter, is described. The laser is constructed by using a semiconductor optical amplifier, a fiber Fabry-Perot tunable filter, and 3.348 km fiber ring cavity. The wavelength sweeps are repeatedly generated with the repetition period of 61 kHz which is the first parallel oscillation frequency of the Fabry-Perot tunable filter for the low power consumption. Mode-locking is implemented by 3.348 km fiber ring cavity for matching the fundamental of cavity roundtrip time to the sweep period. The wavelength tuning range of the laser is 87 nm(FWHM) and the average output power is 1.284 mW.

Key Words : Wavelength swept source, FFP-TF, Wavelength tuning, FD-OCT, Mode-locking

1. 서 론

OCT(optical coherence tomography)는 저간섭성 광원과 간섭계를 이용하여 생체 내부 영상을 구현하는 영상기술이며, 마이크로미터 단위의 해상도를 가지고 생체 내부 영상을 비절개, 비침습적으로 획득할 수 있다.

OCT는 시스템의 구조와 원리에 따라서 시간영역(TD : time domain)과 주파수영역(FD : frequency domain)으로 분류할 수 있다[1,2]. TD-OCT는 간섭계의 기준단 길이를 가변함으로써 깊이정보를 획득하고 영상으로 구현한다. FD-OCT는 반사광을 각각의 파장별로 분리시켜 검출한 후, 푸리에 변환(fourier transform)을 통하여 깊이 정보를 획득하는 방법, 또는 파장가변 레이저를 광원으로 사용하여 샘플 깊이에 따른 비트 주파수(beat frequency)를 검출, 이를 푸리에 변환함으로써 깊이정보를 획득하는 방법이다[2,3].

FD-OCT의 광원을 위한 파장가변 레이저는 20 kHz 이상의 고속의 파장가변을 요구한다. 이는 초당 30 프레임(frame)의 실시간 영상출력을 위한 조건이다[4]. 또한 넓은 파장가변 대역폭과 좁은 선폭의 특성을 가지고 있어야 한다. 이러한 사항들은 FD-OCT 시스템의 분해능(resolution), 신호 대 잡음비(SNR : signal to noise ratio), 투과깊이에 직접적으로 영향을 준다[3,4].

본 논문에서는 FD-OCT 광원의 파장가변 요소인 광섬유 패브리-페로 필터(FFP-TF : fiber Fabry-Perot tunable filter)의 공진특성에 대한 연구결과를 제시한다. FFP-TF를

제 1 병렬공진점인 61 kHz에서 구동함으로써 실제 파장가변속도가 122 kHz인 레이저를 구현하였다. 또한 공진기 내에 광섬유 지연선을 삽입하여 광의 순회시간이 파장가변 주기와 동기(synchronization)된 파장가변 모드잠김 레이저(wavelength swept mode-locked laser)를 구성하였다. 제작된 광원의 파장가변 대역폭과 평균출력은 각각 87 nm(FWHM), 1.284 mW이었다.

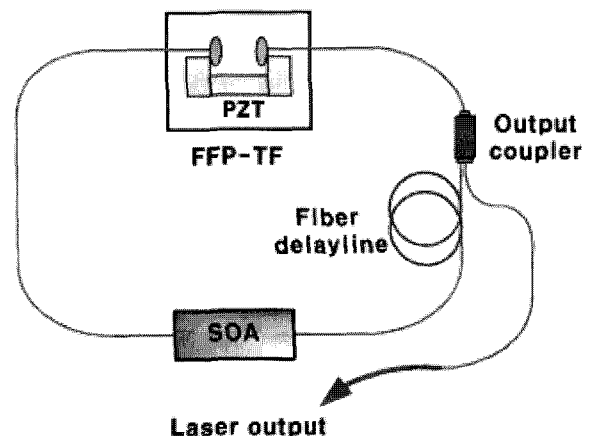


그림 1 파장가변 모드잠김 링 레이저
Fig. 1 Wavelength swept Mode-locked ring laser

2. 파장가변 모드잠김 레이저의 동작원리

그림 1은 파장가변 모드잠김 레이저의 구성을 나타낸 그림이다. 이득매질에서 나온 광이 FFP-TF를 통해 특정 파장

† 교신저자, 정회원 : 경희대학교 전자정보대학 교수 · 공박

E-mail : ypkim@khu.ac.kr

* 정 회원 : 경희대학교 전자정보대학 박사과정

접수일자 : 2009년 2월 19일

최종완료 : 2009년 6월 11일

으로 필터링 되며 이 파장의 광이 공진하여 레이저로 발진한다. 그리고 FFP-TF의 공극간격을 변화시켜 연속적으로 파장이 스위프(sweep)하는 레이저를 구현할 수 있다. 이 때, 공진기 내부에 지연선을 설치하여 광이 공진기를 순회하는 시간을 조절한다. 공진기를 순회하는 시간이 필터의 스위프 주기에 배수가 되면, 필터링(filtering) 된 파장성분은 순회한 후 FFP-TF에서 동일한 파장성분으로 통과하여 공진한다. 일반적인 파장가변 링 레이저와 비교하여 높은 스위프 주파수의 레이저를 구현할 수 있으며, 스위프 주파수에 의하여 출력력이 저하되지 않는 장점을 가지고 있다[5,6].

공진기의 길이와 공진기 내 광의 지연시간은 식(1)로 계산할 수 있다.

$$n\tau_{sweep} = \frac{l_{cavity}}{v} \tag{1}$$

여기서 n 은 광이 공진기 내를 순회하는 횟수이며, τ_{sweep} 은 공진기 내 광의 순회 시간, l_{cavity} 는 공진기 길이, v 는 공진기 내부에서의 광의 속도이다.

3. FFP-TF의 구동특성

레이저의 발진파장은 FFP-TF 내부 공극간격에 의하여 결정된다. FFP-TF 내부에는 공극간격을 변화시키기 위한 압전소자(PZT : piezoelectronic transducer)가 있다. PZT에 인가되는 전압에 따라 PZT의 변위가 달라져 FFP-TF의 공극간격이 가변된다. 따라서 FFP-TF에 정현신호의 전압을 인가하면 발진파장이 스위프한다. 실험에 사용한 FFP-TF는 LambdaQuest사의 제품으로 FSR(free spectral range)=150 nm, finesse=550, 삽입손실=2 dB의 특성을 가지고 있고 한 FSR을 스위프하는데 필요한 전압은, 직류전압으로 구동할 경우 16 Vp-p이다.

그림 2는 FFP-TF의 구동주파수에 따른 임피던스(impedance)를 나타낸 그림이다. 신호발생기를 통하여 교류

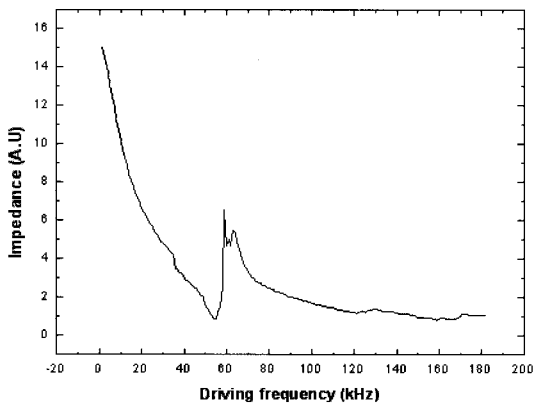


그림 2 FFP-TF의 구동주파수에 따른 임피던스.
Fig. 2 Impedance of FFP-TF from the different driving frequency

전압을 FFP-TF에 인가하고, 인가되는 교류전압의 주파수를 변화시키면서 FFP-TF에 인가되는 전압을 측정하였다. PZT는 고유의 공진점을 가지게 되는데, 이러한 공진점은 PZT의 크기, 구성성분과 불순물, 압착, 열처리, 분극형성 등의 제작 조건들에 따라 결정된다. 공진점은 FFP-TF의 구동주파수에 대한 전기적인 특성에 의하여 측정할 수 있다. 이는 병렬공진점에서 상대적으로 높은 임피던스, 낮은 전류소비의 특성을 가지기 때문이다. 또한 직렬공진점에서는 낮은 임피던스, 높은 전류소비의 특성을 가진다.

공진점에서는 낮은 인가전압으로도 FFP-TF의 공극이 한 FSR을 스위프할 수 있을 만큼 변위가 증가한다. 이는 특정 공진점에서 PZT의 편극현상이 상대적으로 커져, 구동변위가 축방향으로 증가하기 때문이다. 따라서 이러한 주파수 대역에서 FFP-TF를 구동할 경우, 16 Vp-p보다 낮은 전압으로 FSR의 파장가변이 가능하다. 실험에 사용된 FFP-TF의 제 1 직렬공진점은 55 kHz, 제 1 병렬공진점은 61 kHz이며, 이 주파수로 FFP-TF를 구동시킬 경우 FSR을 스위프할 수 있는 전압은 각각 1.7 Vp-p, 4.7 Vp-p이었다.

그림 3은 FFP-TF의 구동주파수에 따른 전류소모를 나타낸 그림이다. FFP-TF에 인가되는 정현전압의 크기를 1 Vp-p로 고정하고, 구동주파수를 증가키면서 완충증폭기(buffer amplifier)가 소모하는 전류를 측정하였다. 제 1 직렬공진점과 제 1 병렬공진점에서의 전류값은 각각 80 mA, 40 mA이었다. 또한 160 kHz, 170 kHz 대역에서 각각 직렬공진, 병렬공진을 관찰할 수 있었다. 이러한 대역에서 FFP-TF를 동작시켜 FD-OCT 광원을 구현할 경우, 높은 파장가변에 따른 시스템의 고속동작을 기대할 수 있다.

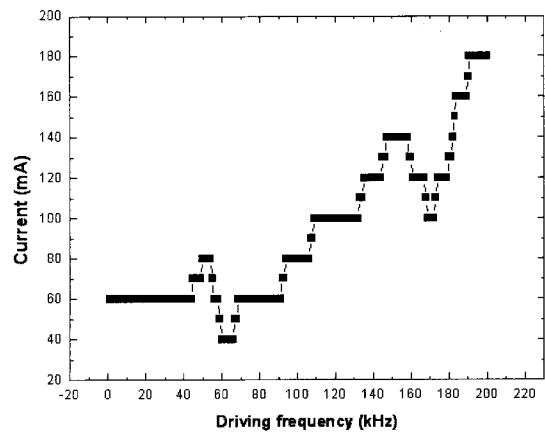


그림 3 FFP-TF의 구동주파수에 따른 전류소모.
Fig. 3 Current consumption of FFP-TF from the different driving frequency

그림 4는 FFP-TF의 구동주파수에 따른 튜닝(tuning)범위를 측정된 그림이다. 필터에 인가되는 정현전압의 크기를 1 Vp-p로 고정하고, FFP-TF의 입력단에 SOA에서 출력되는 ASE(amplified spontaneous emission)를 입사시키고 필

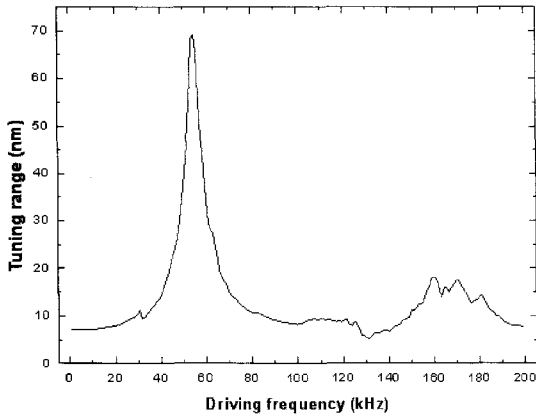


그림 4 FFP-TF의 구동주파수에 따른 튜닝범위.
 Fig. 4 Tuning range of FFP-TF from the different driving frequency

터를 통하여 나오는 광출력의 -6 dB점의 파장대역을 측정하였다. 구동주파수 55 kHz에서의 튜닝범위는 69 nm이다. 한 FSR을 튜닝할 수 있는 전압과 전류는 각각 1.7 Vp-p, 160 mA이었으며 소모전력은 43 mW이었다. 구동주파수 61 kHz에서의 튜닝범위는 29 nm이지만 임피던스가 높은 병렬공진점이기 때문에 상대적으로 전류소모가 작다. 따라서 소모전력이 작아질 수 있다. 61 kHz에서 한 FSR을 튜닝할 수 있는 전압, 전류, 전력은 각각 4.7 Vp-p, 80 mA, 30 mW이었다. 즉 제 1 직렬공진점과 병렬공진점을 비교했을 때, 병렬공진점에서 FFP-TF를 구동하는 것이 속도와 전력소모의 관점에서 적합하다.

그림 5는 광 스펙트럼분석기(OSA : optical spectrum analyzer)로 측정한 구동주파수에 따른 튜닝범위이다. 필터는 1 Vp-p의 정현전압으로 동작시켰으며 구동주파수는 각각 1 kHz, 55 kHz(제 1 직렬공진점), 61 kHz(제 1 병렬공진점), 170 kHz(제 2 병렬공진점)이다. FFP-TF를 170 kHz에서 구동할 경우, 한 FSR을 튜닝할 수 있는 전압과 전류, 소

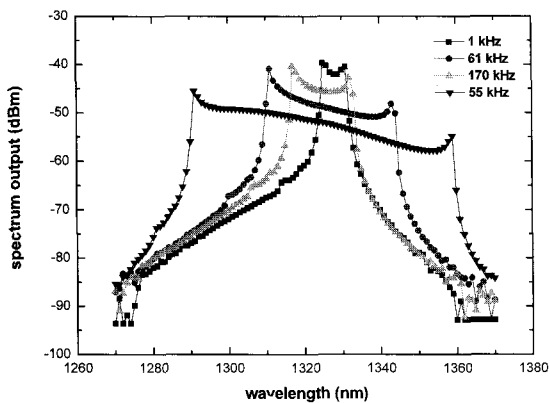


그림 5 특정 구동 주파수에서의 FFP-TF 투과 스펙트럼.
 Fig. 5 transmission spectrum of FFP-TF from the specified driving frequency

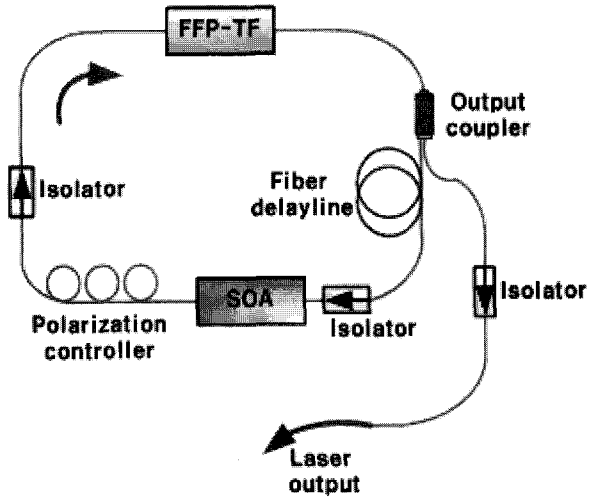


그림 6 파장가변 모드잠김 링 레이저의 구성
 Fig. 6 Schematic diagram of the wavelength swept Mode-locked ring laser

모전력은 각각 8.3 Vp-p, 900 mA, 6.7 W이었다. 이와 같이 FFP-TF의 고속동작은 최대 허용전류에 따른 안정성 문제, 소모전력의 상승에 따른 발열문제가 수반된다. 이와 같은 문제를 피하기 위해 20 kHz 이상의 파장가변을 구현함과 동시에 전력소모가 적어 안정적인 파장가변이 가능한 병렬공진점인 61 kHz에서 동작하는 모드잠김 레이저를 제작하였다.

4. 파장가변 모드잠김 레이저의 구현

그림 6은 구성된 파장가변 모드잠김 레이저이다. 레이저의 이득으로서 사용된 SOA는 InPhenix사의 제품으로서 중심파장, 이득, 3 dB 대역폭은 각각 1300 nm, 20.6 dB, 60 nm 이다. 모드잠김은 공진기 내부에 광의 순회시간과

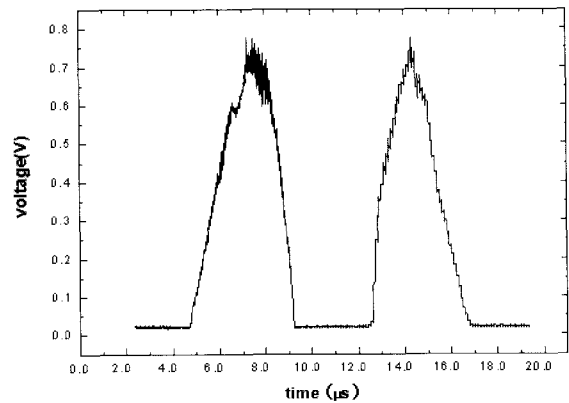


그림 8 파장가변 모드잠김 레이저의 시간적 세기
 Fig. 8 Temporal intensity of the wavelength swept Mode-locked laser

FFP-TF의 구동주기가 정확하게 동기가 됨으로서 구현된다. 이를 위하여 길이 3.348 km의 광섬유 지연선을 삽입하여 광이 공진기를 한번 순회하는 시간은 16.3 μ s가 되게 하였으며, 이는 FFP-TF가 61 kHz의 정현전압으로 구동 될 경우 한주기의 시간에 해당된다.

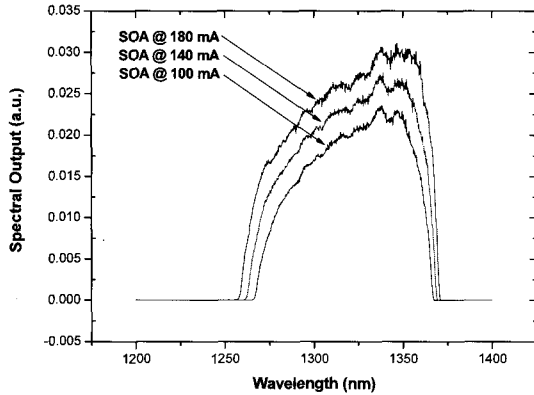


그림 7 파장가변 모드잠김 레이저의 출력 스펙트럼.
 Fig. 7 Output spectra of the wavelength swept Mode-locked laser

그림 7은 제작한 광원의 스펙트럼을 측정된 결과이다. 파장가변 대역폭은 중심파장이 1320 nm이며, 장파장영역의 레이저출력이 단파장영역의 레이저보다 증가하여 비대칭의 가우시안(gaussian)형태로 나타난다. 이는 광이 공진할 때, SOA에서 발생하는 4-광파 혼합(four-wave mixing)으로 인한 비선형 현상이다[4]. 파장가변 대역폭은 SOA에 인가되는 전류가 증가함에 따라 확대된다. SOA에 100mA, 140 mA, 180 mA의 펄핑전류를 인가 한 경우, 파장가변 대역폭은 각각 47 nm, 71 nm, 87 nm(FWHM)이었다.

그림 8은 제작한 광원의 시간에 따른 세기(intensity)를 광 검출기로 측정된 그림이다. 61 kHz의 정현전압을 인가하여 FFP-TF를 구동시킬 경우, 정현전압이 상승, 하강함에 따라서 2번의 파장스weep이 이루어진다. 따라서 실제 발진파장이 스윕하는 주파수는 122 kHz이며, 레이저의 평균출력은 1.284 mW이었다.

5. 결 론

본 연구는 FD-OCT 광원의 파장가변 요소인 FFP-TF의 공진특성을 측정함으로써 구동속도를 결정하고 이를 토대로 파장가변 모드잠김 레이저를 구현하였다. 파장가변 요소인 FFP-TF를 제 1 병렬공진점인 61 kHz에서 구동시킴으로써 고속, 저전력의 파장가변을 이루어졌다. 이로써 OCT광원의 요구사항인 20 kHz 이상의 고속의 파장가변이 가능하고, FFP-TF를 다른 주파수대역에서의 구동시킬 경우보다 전력

소모가 작기 때문에 안정적인 파장가변을 이룰 수 있었다. 레이저의 평균출력은 1.284 mW, 실제 파장가변 주파수 122 kHz, 파장 가변범위 87 nm(FWHM)의 특성을 가짐으로서, 이는 FD-OCT의 광원에서 요구되는 조건에 충분히 부합한다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R11-2002-103).

참 고 문 헌

[1] Y. Yasuno, V. Madjarova, S. Makita, M. Akiba, A. Morosawa, C. Chong, T. Sakai, K. Chan, M. Itoh, and T. Yatagai, "Three-dimensional and high-speed swept-source optical coherence tomography for in vivo investigation of human anterior eye segments," *Opt. Express* 13, pp.10652-10664, 2005.

[2] R. Leitgeb, C. K. Hitzenberger, and A. F. Fercher, "Performance of Fourier domain vs. time domain optical coherence tomography," *Opt. Express* 11, pp.889-894, 2003.

[3] M. A. Choma, M. V. Sarunic, C. Yang, and J. Izatt, "Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography," *Opt. Express* 11, pp.2183-2189, 2003.

[4] R. Huber, M. Wojtkowski, K. Taira, J. G. Fujimoto, and K. Hsu, "Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging: design and scaling principles," *Opt. Express* 13, pp.3513-3828, 2005.

[5] R. Huber, M. Wojtkowski, and J. G. Fujimoto, "Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography" *Opt. Express* 14, pp.3225-3237, 2006.

[6] Robert Huber, Desmond C. Adler, and James G. Fujimoto, "Buffered Fourier domain mode locking: unidirectional swept laser sources for optical coherence tomography imaging at 370,000 lines/s," *Opt. Lett.*, 31(20), pp.2975-2977, 2006.

저 자 소 개



이 응 제 (李 應 齋)

1976년 11월 30일생. 2002년 경희대학교 전자공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2004년~현재 동 대학원 전자정보대학 박사과정

Tel : 031-201-2867

Fax : 031-203-2931

E-mail : ejlee@khu.ac.kr



김 용 평 (金 容 平)

1955년 2월 9일생. 1979년 경희대학교 전자공학과 졸업. 1981년 동대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1986년 keio대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 경희대학교 전자정보대학 교수

Tel : 031-201-2931

Fax : 031-203-2931

E-mail : ypkim@khu.ac.kr