

Fabrication and Output Characteristics of a High-Speed Wavelength Swept Mode-Locked Laser

李應齊* · 金容平†
(Eung-Je Lee · Yong-Pyung Kim)

Abstract - We demonstrate a wavelength swept mode-locked ring laser for the frequency domain optical coherence tomography(FD OCT). A laser is constructed by using a semiconductor optical amplifier, fiber Fabry-Perot tunable filter and 2.6 km fiber ring cavity. Mode-locking is implemented by 2.6 km fiber ring cavity for matching the fundamental or harmonic of cavity roundtrip time to a sweep period. The wavelength sweeps are repetitively generated with the repetition period of 77.2 kHz which is the parallel resonance frequency of Fabry-Perot tunable filter for the low driving current consumption of the fiber Fabry-Perot tunable filter. The wavelength tuning range of the laser is more than FWHM of 61 nm centered at the wavelength of 1320 nm and the linewidth of the source is 0.014±0.002 nm.

Key Words : wavelength swept source, FD OCT, wavelength tuning, mode-locking

1. 서 론

OCT(optical coherence tomography)는 저간섭성 광원과 간섭계를 이용하여 생체 내부 영상을 구현하는 차세대 영상 기술이다. OCT는 마이크로미터 단위의 해상도를 가지며 생체 내부 영상을 비절개, 비침습적으로 획득할 수 있다.

OCT는 시스템의 원리와 구조에 따라서 시간영역(TD : time domain)과 주파수영역(FD : frequency domain)으로 분류할 수 있다[1,2]. TD OCT는 간섭계의 기준단 길이를 가변함으로써 깊이정보를 획득하여 영상을 구현한다. FD OCT는 기준단의 물리적인 동작 없이 빛을 각각의 파장대별로 분리시켜 검출한 후, 푸리에 변환을 통하여 깊이 정보를 획득하는 방법, 또는 파장가변 레이저를 광원으로 사용하여 샘플 깊이에 따른 비트 주파수(beat frequency)를 검출, 이를 푸리에 변환함으로써 깊이 정보를 획득하는 방법이다 [2,3]. TD OCT와 비교하여 FD OCT는 물리적인 동작이 없기 때문에 고속으로 동작할 수 있으며, 수신단에 사용하는 분광기의 분해능이 높고, 레이저의 선폭(linewidth)이 좁을수록 신호 대 잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)가 높아지는 장점이 있다[3,4,5].

FD OCT의 광원을 위한 파장가변 레이저에 요구되는 특성들은 다음과 같다. ① 넓은 파장가변 대역폭 ② 좁은 선폭 ③ 고속의 파장가변이 이루어져야 한다. 이러한 사항들은 FD OCT 시스템의 분해능(resolution), 투과깊이, 영상출력속도를 결정한다[3]. 실제 FD OCT광원은 실시간 영상구현을 위하여 수십 kHz 이상의 파장가변 속도, 파장가변 범

위는 수십 nm 이상, 선폭은 0.1nm 이하의 특성을 만족시켜야 한다[6].

본 연구에서는 반도체 광 증폭기(SOA : Semiconductor Optical Amplifier)와 광섬유 패브리 페로 필터(FFP-TF : Fiber Fabry-Perot Tunable Filter)를 이용하여 고리형 레이저(ring laser)를 제작하였고, 공진기를 진행하는 광이 순회하는 시간을 FFP-TF의 스위프(sweep)주기에 동기시켜 모드잠김(mode-locking)을 구현하였다. 또한 FFP-TF를 정현 전압으로 구동할 때, FFP-TF 고유의 병렬 공진주파수 대역에서 구동함으로써 상대적으로 낮은 전류로 FFP-TF가 구동할 수 있음을 보였다.

2. 파장가변 모드잠김 레이저의 동작원리

그림 1 (a)는 일반적인 파장가변 링 레이저를 나타낸 그림이고, 그림 1 (b)는 파장가변 모드잠김 링 레이저를 나타낸 그림이다. 일반적인 형태의 파장가변 링 레이저의 경우, 이득매질에서 나온 광이 FFP-TF를 통해 특정 파장으로 필터링되며 이 파장의 광이 공진하여 레이저로 발진한다. 그리고 FFP-TF의 공극간격을 변화시켜 연속적으로 파장이 스위핑하는 레이저를 구현할 수 있다. 공진기 내의 광이 포화(saturation)가 유지되어 레이징 될 때, 파장 스위프 주파수는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{sweep} \approx \frac{\Delta\lambda \eta c \log(G\rho)}{Ln_{ref} \Delta\lambda_{tuning\ range} \log\left(\frac{P_{sat} \Delta\lambda_{tuning\ range}}{\Delta\lambda P_{ASDtotal}}\right)} \quad (1)$$

$\Delta\lambda$ 는 FFP-TF에 의해 투과되는 선폭, $\Delta\lambda_{tuning\ range}$ 는 FFP-TF의 FSR(free spectral range), L은 공진기의 길이,

* 學生會員 : 慶熙大學校 電子情報大學 博士課程

† 교신저자, 正會員 : 慶熙大學校 電子情報大學 教授 · 工博

E-mail : ypkim@khu.ac.kr

接受日字 : 2007年 4月 2日

最終完了 : 2007年 4月 25日

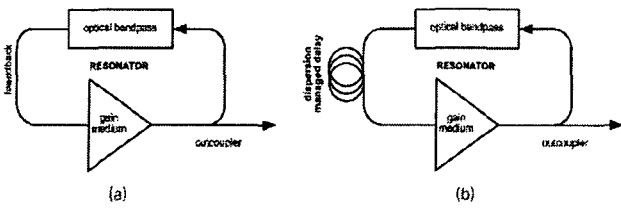


그림 1 파장가변 링 레이저
 (a) 일반적인 파장가변 링 레이저
 (b) 파장가변 모드잠김 링 레이저

Fig. 1 wavelength swept ring laser
 (a) standard wavelength swept ring laser
 (b) wavelength swept Mode-locked ring laser

n_{ref} 는 굴절률, c 는 광의 속도, $P_{ASEtotal}$ 는 ASE 출력값, P_{sat} 는 포화출력값, ρ 는 공진기안의 손실을 나타낸다.

이러한 조건들에 의하여 레이저의 최대 스위프 주파수는 제한된다. 스위프 주파수가 높으면 공진기 내부를 순회하는 광의 포화가 억제되기 때문이다. 따라서 FFP-TF의 구동 주파수가 높아질수록, 이득이 높고 공진기의 길이가 최대한 짧아야 레이저로 발진이 이루어 질 수 있다[6].

그림 1 (b)의 경우는 공진기 내부에 지연선(delayline)을 설치하여 광이 공진기를 순회하는 시간을 조절한다. 공진기를 순회하는 시간이 필터의 스위프 주기에 배수가 되면, 필터링 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 출력이 저하되지 않는 장점을 가지고 있다[7].

공진기의 길이와 공진기 내 광의 지연시간은 식(2)로 계산할 수 있다.

$$n\tau_{sweep} = \frac{l_{cavity}}{c} \quad (2)$$

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

3. 실험 및 결과

그림 2는 구현된 파장가변 모드잠김 링 레이저 시스템의 구성이다.

레이저의 발진파장은 FFP-TF 내부 공극간격에 의하여 결정된다. FFP-TF 내부에는 공극 간격을 변화시키기 위한 압전소자(PZT : Piezoelectronic Transducer)가 있다. PZT에 인가되는 전압에 따라 PZT의 변위가 달라져 FFP-TF의 공극간격이 변화한다. 따라서 FFP-TF에 정현신호의 전압을 인가하면 발진 파장이 스위프를 하게 된다. 실험에 사용한 FFP-TF는 lambdaquest사의 제품으로서 FSR=97 nm, Finesse=500, 삽입손실=3 dB의 특성을 가지고 있고 한 FSR을 스위프하는데 필요한 전압은 20 Vp-p이다.

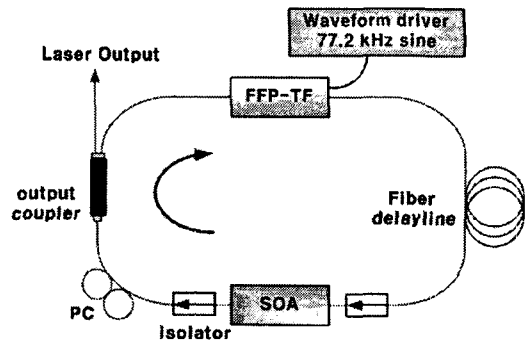


그림 2 파장가변 모드잠김 링 레이저의 구성
 Fig. 2 Schematic diagram of the wavelength swept Mode-locked ring laser

PZT는 유도성 리액턴스(reactance)성분으로 인해 특정한 주파수대역에서 직렬 공진주파수와 병렬 공진주파수를 가지며, 병렬 공진주파수에서 상대적으로 높은 임피던스를 가진다. 또한 특정한 공진주파수에서는 낮은 인가전압으로도 FFP-TF의 공극이 한 FSR을 스위프할 수 있을 만큼 변위가 증가한다. 이는 PZT의 편극현상으로 인하여, PZT의 구동변위가 공극의 축방향으로 증가하기 때문이다. 이러한 주파수대역에서 FFP-TF를 구동할 경우, 20 Vp-p보다 낮은 전압과 수십 mA의 구동전류로 FSR영역의 파장가변이 가능하다. 구동주파수에 따른 FFP-TF의 임피던스(impedance)를 측정한 결과를 그림 3에서 보여주고 있다. FFP-TF 내부 PZT의 병렬 공진주파수는 77.2 kHz, 105.5 kHz, 135 kHz이며, 제 1 병렬 공진주파수인 77.2 kHz에서 FSR을 스위프할 수 있는 전압은 4.1 Vp-p이며, 구동 전류는 70 mA 이다.

모드잠김을 구현하기 위해서는 공진기 내부에 광의 순회 시간과 FFP-TF의 구동주기가 정확하게 동기가 되어야 한다. 이를 위하여 길이 2.6 km의 광섬유를 삽입하여 공진기의 길이를 설정하였다. 광이 공진기를 한번 순회하는 시간은 12.9 μ s이며, 이는 FFP-TF가 77.2 kHz의 정현전압으로 구동 될 때 한주기의 시간에 해당된다.

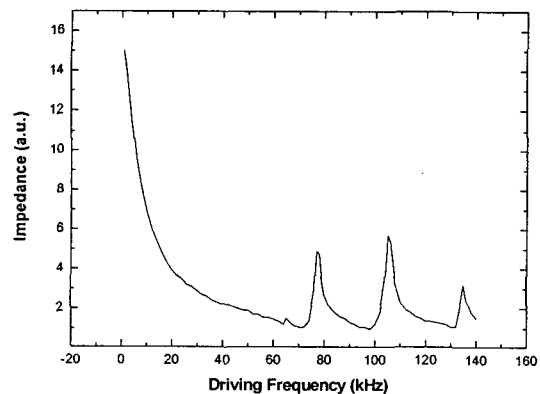


그림 3 FFP-TF의 구동주파수에 따른 임피던스.
 Fig. 3 Impedance of FFP-TF from the different driving frequency

실험에 사용된 SOA는 InPhenix사의 제품으로 중심파장 1300nm, 이득 20.6 dB, 3 dB 대역폭은 60 nm의 특성을 가지고 있다. 공진기 내부에 광을 단방향으로 진행시키기 위해 광 절연체(optical isolator)를 SOA의 입출력단에 설치하였다. SOA에의 출력단에 편광조절기를 설치하여 광섬유에 의한 편광모드 분산을 조절하였다. 30:70의 비율로 광을 분배해주는 광 출력 분배기 (optical output coupler)를 이용하여 공진기 밖으로 30%의 출력이 나오게 하였다. 공진기를 구성하고 있는 소자들에 의한 손실은 13.11 dB 이다. 출력단에 광 절연체를 설치하여 공진기 내부로 입사될 양을 최소화 시켰고, 이를 광출력 분배기를 사용하여 광 스펙트럼 분석기(OSA : Optical Spectrum Analyzer)와 광 검출기(PD: Photo Detector)에 입사시켜 출력스펙트럼과 시간에 따른 세기를 측정하였다.

그림 4는 스위프주파수 77.2 kHz의 파장가변 모드잠김 레이저를 광 스펙트럼 분석기로 측정한 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[6]. 파장가변 대역폭은 SOA에 인가되는 전류가 증가함에 따라 확대된다. SOA에 140 mA를 인가 할 경우, 스펙트럼 좌측 끝단에서 파장성분이 튀는 것을 볼 수 있다. 이는 ASE 대역폭이 확대함으로써 FFP-TF의 FSR인 97 nm보다 넓어지기 때문이다. 이와 같은 현상을 억제하기 위해서는 FFP-TF의 FSR이 SOA의 이득 대역폭보다 충분히 넓어야 한다.

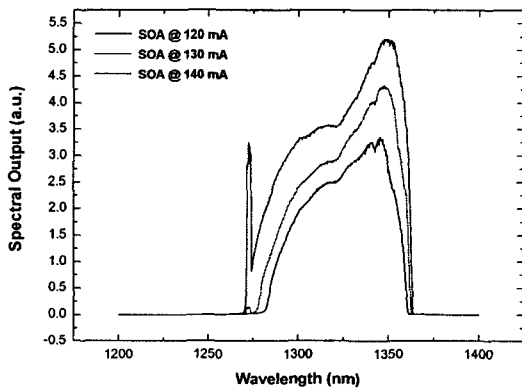


그림 4 파장가변 모드잠김 레이저의 출력 스펙트럼.
Fig. 4 Output spectra of the wavelength swept Mode-locked laser

그림 5는 파장가변 모드잠김 레이저의 시간에 따른 세기(intensity)를 광 검출기로 측정한 그림이다. 77.2 kHz의 정현전압을 인가하여 FFP-TF를 구동시킬 경우, 정현전압이 상승, 하강함에 따라서 2번의 파장스weep이 이루어진다. FFP-TF에 인가되는 전압이 상승할 경우, FFP-TF내 공극간격이 늘어남으로서, 단파장영역에서 장파장 영역으로 발진 파장이 이동한다. 이를 정방향 주사(forward scanning)라 한다. 인가되는 전압이 하강 할 경우 공극간격이 줄어들어, 발

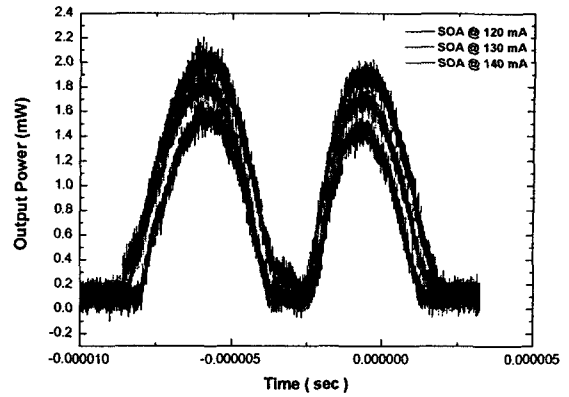


그림 5 파장가변 모드잠김 레이저의 시간적 세기
Fig. 5 Temporal intensity of the wavelength swept Mode-locked laser

진하는 파장은 장파장 영역에서 단파장영역으로 이동한다. 이를 역방향 주사(backward scanning)라고 한다. 이와 같은 파장 주사(scanning)가 2번 이루어지기 때문에 실제 발진 파장이 스위핑하는 주파수는 154.4 kHz이다.

SOA에 전류 펌핑을 하였을 때, 파장가변 대역의 반치폭(FWHM : full width half maximum), 평균파워(average power), 첨두파워(peak power)는 표 1과 같다.

표 1 SOA의 펌핑전류에 따른 파장가변 모드잠김 레이저 출력의 FWHM, 평균파워, 첨두파워

Table 1 FWHM of the Tuning range, average power and peak power of the wavelength swept Mode-locked laser from different pumping current

	FWHM (nm)	average power (mW)	peak power (mW)
SOA @120mA	61.1	1.183	1.570
SOA @130mA	63.5	1.489	1.819
SOA @140mA	73.3	1.629	2.052

그림 6은 RF 스펙트럼 분석기(RF spectrum analyzer)로 레이저의 선폭을 측정한 그림이다. 선폭의 측정을 위해 11.3 km의 광섬유 지연선과 마하젠더 간섭계(mach-zhender interferometer)로 구성된 자기 호모다인(self homodyne) 측정 장치를 구성하였다. 마하젠더 간섭계의 광섬유 지연선로의 길이는 측정하고자 하는 입력광의 간섭시간(coherence time)보다 충분히 길게 하여 충분한 해상도를 갖게 한다[8]. FFP-TF를 구동 시키지 않은 상태에서 레이저의 주파수폭을 측정하였을 경우, 레이저의 선폭은 3 dB기준으로 약 2.5 GHz이며, 이를 환산하면 0.014±0.002 nm에 해당한다.

참 고 문 헌

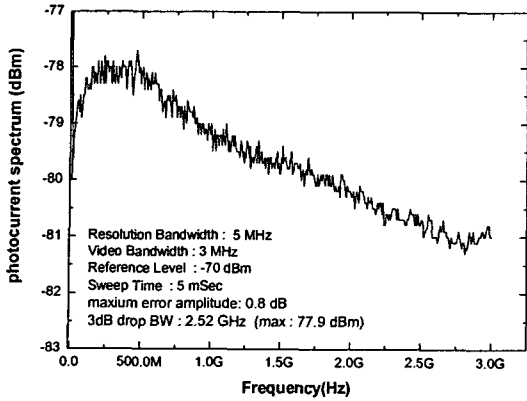


그림 6 레이저의 선폭측정
Fig. 6 Linewidth measurement of the laser

4. 결 론

본 연구는 FD OCT의 광원으로 사용하기 위하여 파장가변 모드잠김 레이저를 구현함으로써 기존의 파장가변 링 레이저에서 구현하기 어려운 고속의 파장가변을 이루었다. 개발된 레이저 시스템은 FFP-TF의 병렬공진 주파수인 77.2 kHz에서 파장 스위칭이 가능하고 병렬공진 주파수 대역에서 FFP-TF를 구동함으로써 저전력의 파장가변레이저를 구현하였다.

레이저의 평균출력은 1 mW이상, 스위칭주파수 154.4 kHz, 파장 스위칭범위 61 nm이상(FWHM), 선폭 0.014 ±0.002 nm의 특성을 가진다. 이는 FD OCT의 광원에서 요구되는 조건을 충분히 만족하고 있다.

향후, 현재 레이저의 출력을 증폭하기 위한 booster SOA를 장착하여 시스템을 개선할 예정이며, 최종적으로는 FD OCT의 구현을 목표로 하고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 우수연구센터(R11-2002-103)와 2004~2005년도 경희대학교 지원에 의해 수행되었음.

[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] S. H. Yun, C. Boudoux, M. C. Pierce, J. F. de Boer, G. J. Tearney and B. E. Bouma, "Extended-cavity semiconductor wavelength-swept laser for biomedical imaging," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16(1), pp.293-295, 2004.

[5] S. H. Yun, C. Boudoux, G. J. Tearney and B. E. Bouma, "High-speed wavelength-swept semiconductor laser with a polygon-scanner-based wavelength filter," *Opt.Lett.*, 28(20), pp.1981-1983, 2003.

[6] 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.

[7] 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.

[8] W. V. Sorin, "High resolution optical frequency analysis" in *Fiber optic test and measurement*, D. Derickson, ed. Hewlett Packard Company, Prentice Hall, 1998.

저 자 소 개



이 응 제 (李 應 齊)

1976년 11월 30일생. 2002년 경희대학교 전자공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2004년~현재 동 대학원 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 Keio 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 경희대학교 전자정보대학 교수

Tel : 031-201-2931

Fax : 031-203-2931

E-mail : ypkim@khu.ac.kr