

링 레이저를 위한 새로운 광대역 파장 가변 필터에 대한 연구

A Study on the New Widely Tunable Optical Filter for Ring Laser

김 광 유* 이 정 렬** 엄 진 섭***
Kim, Kwang-Yoo Lee, Jung-Ryul Eom, Jin-Seob

Abstract

In this paper, we proposed the new wavelength tunable filter for wide tunability of fiber ring laser. The proposed filter consists of the cascaded connection of Fiber Reflection Mach-Zehnder Interferometer and Sagnac filter or of hybrid filter and Fiber Reflection Mach-Zehnder Interferometer. The simulation shows that the continuous tunable range of 50nm can be obtained and that more stable single mode operation of ring laser can be expected due to narrow FWHM. of filter spectrum.

키워드 : 파장 가변 필터, 파장 가변 광섬유 링 레이저, 싸낙 필터
Keywords : *wavelength tunable filter, tunable fiber ring laser, Sagnac filter*

1. 서론

인터넷의 확산과 함께 고화질 및 양방향 TV, 화상전화 등의 멀티미디어 서비스, 전자상거래, 홈네트워크 등 정보화 사회의 급속한 발전에 따라 가입자가 원하는 서비스 형태는 점차 고속화 및 광대역 대용량화 되어가고 있다. 이러한 폭발적인 통신수요의 증가는 가장 경제적이고 효율적인 고속 전송 수단이기 때문에 현재 기간 통신망으로 이용되고 있는 광통신에 대해서도 계속되는 광대역 대용량화 및 초고속 기술을 요구하고 있다.

파장 가변 레이저는 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing) 광통신 네트워크를 유연하게 구성할 수 있는 긴요한 방안으로

서뿐만 아니라 광회선 분배기(Optical Cross Connect) 및 광 패킷 스위칭에서의 파장 라우팅 등에도 적용될 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때 파장 가변 단일 모드 레이저 광원은 가까운 시일내에 광 네트워크 시스템에서 매우 중요하면서도 필수적인 능동소자가 될 전망이다.

광원의 좁은 선폭(linewidth)과 함께 넓은 대역에 걸친 파장의 가변성은 파장 가변 광원으로서 필수적으로 요구되는 사항이다. 광섬유 링 레이저(Fiber Ring Laser)를 이용하여 좁은 선폭을 가지는 광원에 대한 연구와 넓은 파장 범위에 대하여 가변시킬 수 있는 광원에 대한 연구가 계속되고 있다[1][2].

본 논문에서는 발전 파장의 좁은 선폭과 넓은 가변 범위를 구현하기 위해 FRMZI(Fiber Reflection Mach-Zehnder Interferometer)와 Sagnac 간섭계가 직렬로 연결된 구조 및 하이브리드(hybrid)필터와 FRMZI가 직렬로 연결된 구조 등 2가지 종류의 파장 가변 필터(wavelength tunable filter)를 새로이 제안하였다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 필터 특성 및 획득가능한 파장 가변 범위 등을 기존의 단

* 강원대학교 대학원 전자공학과 석사과정
** 강원대학교 산학협력중심대학 교수, 공학박사
*** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 교수, 공학박사

일 Sagnac 필터의 경우와 비교 분석하였다.

2. 파장 가변 광섬유 링 레이저

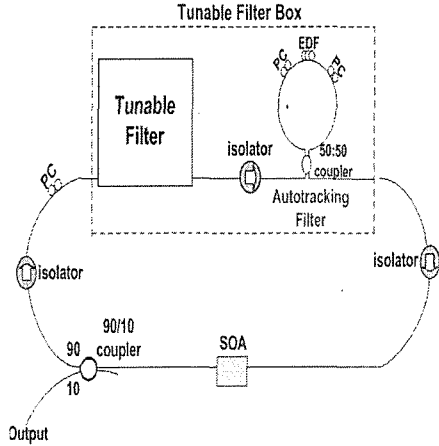


그림 1 파장 가변 링 레이저의 구성도
(PC:Polarization Controller, EDF:Erbium Doped Fiber, SOA:Semiconductor Optical Amplifier)

그림 1은 파장 가변 필터 box와 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)로 이루어진 파장 가변 광섬유 링 레이저의 구성도이다. 이 외에도 레이저 공진기는 광섬유 결합기(coupler), 아이솔레이터(isolator), 편광조절기(Polarization Controller) 등이 추가된다. 아이솔레이터는 공진기 내에서 빛을 한쪽 방향으로만 진행시키기 위하여 사용되며, 편광조절기는 공진기내의 빛의 편광을 조절하기 위하여 사용된다. 광섬유 결합기는 공진기내의 광 일부를 외부로 출력시키기 위하여 사용된다[3]. 파장 가변 필터 box는 뒷 절에서 제안되는 광대역 파장 가변 필터와 autotracking 필터의 연결로 구성된다. SOA로부터 나온 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 빛은 공진기 안을 시계 방향으로 진행하다가 파장 가변 필터 box에 의해 필터링 된 후 다시 이득 매질인 SOA로 들어간다. 이러한 과정이 반복되는 가운데 파장 가변 필터를 가장 큰 강도로 통과한 파장이 SOA에서 가장 많은 이득을 얻게 되어 단일 모드로 발진하게 된다.

Autotracking 필터는 Sagnac 루프 구조를 가지며 어븀 첨가 광섬유(Erbium Doped Fiber)와 편광조절기가 루프내에 놓이게 된다. EDF 안에서는 서로 반대방향으로 진행되는 빛들 간의 간섭으로 인하여 정상파가 형성되는데, 이에 따라 EDF 안에서 길이 방향으로 굴절률이 변하게 된다. 이것이 일종의 광섬유 회절격자(fiber grating)와 같은 역할을 하게 되어 대역폭이 매우 좁은 대역 통과 필터처럼 작용한다. 그런데 필터의 투과파장은 EDF를 진

행하는 빛중에서 가장 강도가 센 파장으로 자동적으로 맞추어지게 되기 때문에 이를 autotracking 필터라 한다[4][5]. 하지만 이 autotracking 필터에 입사되는 빛의 FWHM(Full Width at Half Maximum)이 좁을수록 더욱 우수한 특성을 나타낼 것이다.

위의 설명으로부터 링 레이저의 발진 파장이 좁은 선폭과 넓은 파장 가변범위 및 빠른 가변속도를 가지기 위하여는 파장 가변 필터가 좁은 통과대역폭 즉, 좁은 FWHM과 넓은 FSR(Free Spectral Range) 그리고 빠른 가변속도를 가져야 함을 알 수 있다.

3. 제안된 광대역 파장 가변 필터

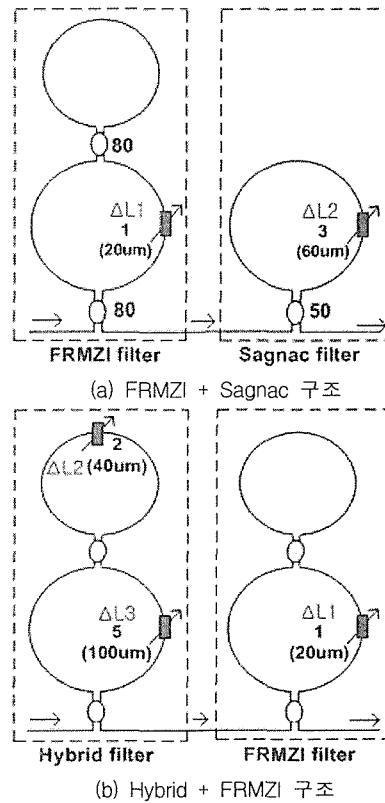


그림 2 제안된 광대역 파장 가변 필터의 구성도

그림 2는 파장 가변 링 레이저를 구성하기 위하여 제안된 광대역 파장 가변 필터의 구성도이다. 그림 2(a)는 FRMZI와 Sagnac 필터가 직렬로 연결된 구조이고, (b)는 하이브리드 필터와 FRMZI가 직렬로 연결된 구조이다. 제안된 두가지 구조에 모두 사용된 FRMZI는 마하젠더 간섭계(Mach-

Zehnder Interferometer)와 Sagnac 루프가 결합된 형태이며, 마하젠더 간섭계의 양쪽 팔의 길이차를 변화시킬 때 발생하는 위상차를 이용하여 투과 파장을 가변시킬 수 있다. 하이브리드 필터는 마하젠더 간섭계와 Sagnac 간섭계가 직렬로 연결된 구조이다.

광대역 파장 가변 특성을 구현하기 위하여 특히 중요한 점은 그림 2(a)에서 FRMZI 필터의 길이차와 Sagnac 필터의 길이차는 1:3으로 유지되어야 하며, (b)에서는 하이브리드 필터와 FRMZI 필터의 각 부분에서의 경로차가 1:2:5로 유지되어야 한다는 점이다.

4. 시뮬레이션을 위한 이론적 배경

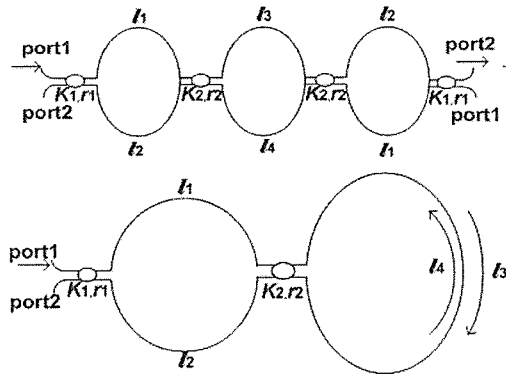


그림 3 FRMZI를 일반화한 후에 전개한 다이어그램

그림 2에서 FRMZI를 일반화시키고, 이를 다시 빛의 진행을 따라 전개한 그림 3의 각 부분에 대하여 Scattering Matrix를 적용하면 식(1)을 얻을 수 있다[6].

진계(Electric Field)가 커플러를 통하여 마하젠더 간섭계의 양쪽 경로에 인가될 때, 커플러의 결합손실(coupling loss)이 무시될 수 있고 빛이 FRMZI를 통과한 후에도 편광에 변화가 없다고 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} e_{out,2} \\ e_{out,1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (1-r_1)^{\frac{1}{2}} K_1^{\frac{1}{2}} & j(1-r_1)^{\frac{1}{2}}(1-K_1)^{\frac{1}{2}} \\ j(1-r_1)^{\frac{1}{2}}(1-K_1)^{\frac{1}{2}} & (1-r_1)^{\frac{1}{2}} K_1^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} e^{-\alpha l_2} e^{j\beta l_2} & 0 \\ 0 & e^{-\alpha l_1} e^{j\beta l_1} \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} (1-r_2)^{\frac{1}{2}} K_2^{\frac{1}{2}} & j(1-r_2)^{\frac{1}{2}}(1-K_2)^{\frac{1}{2}} \\ j(1-r_2)^{\frac{1}{2}}(1-K_2)^{\frac{1}{2}} & (1-r_2)^{\frac{1}{2}} K_2^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} e^{-\alpha l_3} e^{j\beta l_3} & 0 \\ 0 & e^{-\alpha l_4} e^{j\beta l_4} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\times \begin{bmatrix} (1-r_2)^{\frac{1}{2}} K_2^{\frac{1}{2}} & j(1-r_2)^{\frac{1}{2}}(1-K_2)^{\frac{1}{2}} \\ j(1-r_2)^{\frac{1}{2}}(1-K_2)^{\frac{1}{2}} & (1-r_2)^{\frac{1}{2}} K_2^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} e^{-\alpha l_1} e^{j\beta l_1} & 0 \\ 0 & e^{-\alpha l_2} e^{j\beta l_2} \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} (1-r_1)^{\frac{1}{2}} K_1^{\frac{1}{2}} & j(1-r_1)^{\frac{1}{2}}(1-K_1)^{\frac{1}{2}} \\ j(1-r_1)^{\frac{1}{2}}(1-K_1)^{\frac{1}{2}} & (1-r_1)^{\frac{1}{2}} K_1^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)에서 K 와 r 은 각각 커플러의 결합비(coupling ratio)와 결합손실을 나타낸다. α 는 광섬유의 손실을 나타내고, β 는 전파상수(propagation constant)이며, $\beta = 2\pi n_c/\lambda$ 로 나타낼 수 있다. n_c 는 광섬유의 유효굴절률(effective refractive index)이고, λ 는 자유공간에서의 파장이다.

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 제안된 필터의 전달 스펙트럼

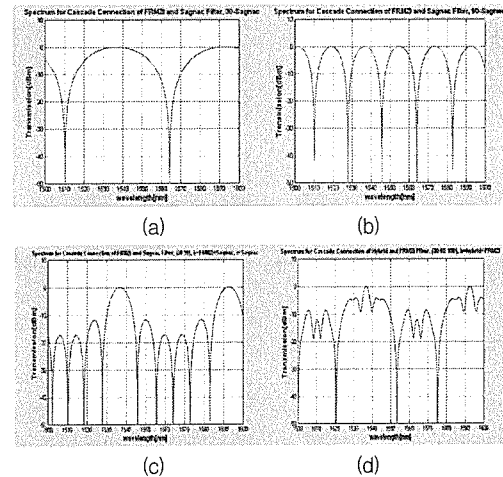


그림 4 기존의 Sagnac 필터와 제안된 필터들간의 통과 스펙트럼 비교. (a) Sagnac 필터만을 사용했을 경우(거리차 = 30 μ m일 때) (b) Sagnac 필터만을 사용했을 경우(거리차 = 90 μ m일 때), (c) FRMZI + Sagnac 필터의 경우($\Delta L_1=30\mu m$, $\Delta L_2=90\mu m$), (d) 하이브리드 필터 + FRMZI의 경우($\Delta L_1=30\mu m$, $\Delta L_2=60\mu m$, $\Delta L_3=150\mu m$)

그림 4는 Sagnac 필터만을 사용한 경우의 통과 스펙트럼((a), (b))과 제안된 광대역 필터들에 대한 통과 스펙트럼들을 보여주고 있다. (a)는 루프의 양방향 거리차가 30 μ m일 때, (b)는 90 μ m일 때이다. (c)는 FRMZI와 Sagnac 필터를 사용하고, $\Delta L_1=30\mu m$, $\Delta L_2=90\mu m$ 일 때의 통과 스펙트럼이다. (d)는 하

이브리드 필터와 FRMZI를 사용하고, $\Delta L1=30\mu\text{m}$, $\Delta L2=60\mu\text{m}$, $\Delta L3=150\mu\text{m}$ 일 때의 통과 스펙트럼이다. Sagnac 필터만을 사용한 경우, 그림 4(a)와 (b)에서 보여진 것처럼, 양방향 거리차가 $30\mu\text{m}$ 일 때는 스펙트럼의 FSR은 약 57nm 이지만 FWHM은 약 28nm 정도인 것을 알 수 있다. 그리고 $90\mu\text{m}$ 일 때는 FSR이 (a)보다 $1/3$ 로 줄어들지만 FWHM은 약 9nm 정도인 것을 알 수 있다. 그러나 그림 4(c)와 (d)에 보여진 것처럼 제안된 구조들은 그림 4(a)의 경우와 FSR이 같으면서도 FWHM은 그림 4(b)와 비슷하거나 더욱 좁아졌음(약 3nm)을 알 수 있다. 이는 제안된 구조들이 링 레이저의 필터로 사용된다면 Sagnac 필터만을 사용한 경우보다 파장 가변 범위 및 선폭 그리고 안정적인 단일모드 발진 등에 있어서 더 우수성을 보장한다는 것을 의미한다. 한편 그림 4(d)는 (c)와 비교될 때 FSR은 같지만 FWHM이 더욱 좁아짐을 보여준다.

5.2 제안된 필터의 파장 가변 특성

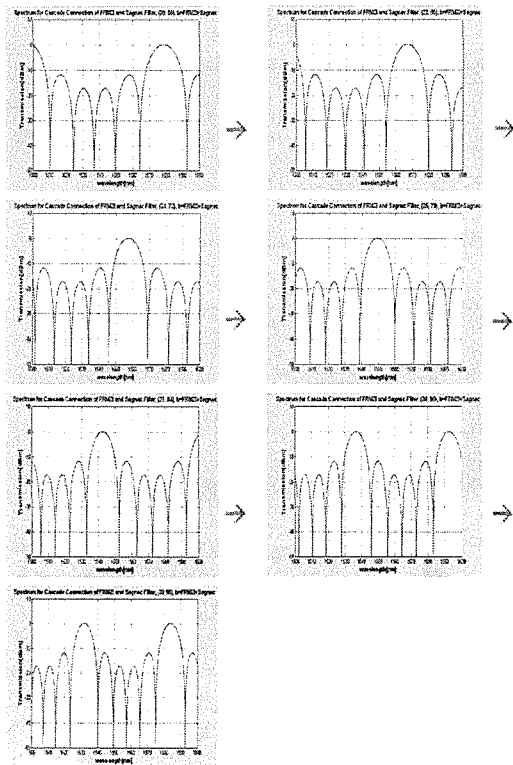


그림 5 FRMZI + Sagnac 필터 구조의 파장 가변 특성 시뮬레이션

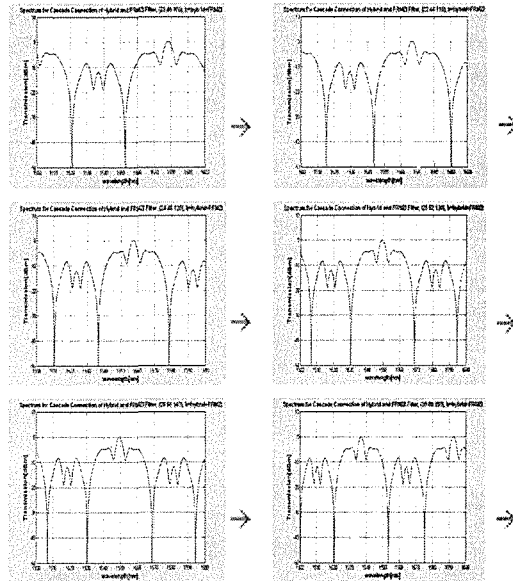


그림 6 하이브리드 필터 + FRMZI 구조의 파장 가변 특성 시뮬레이션

그림 5는 FRMZI와 Sagnac 필터가 사용된 구조에서 $\Delta L1$ 과 $\Delta L2$ 간의 비율을 1:3으로 유지하면서 $20\mu\text{m} \leq \Delta L1 \leq 32\mu\text{m}$, $60\mu\text{m} \leq \Delta L2 \leq 96\mu\text{m}$ 로 각각의 경로차를 7단계로 가변시켰을 때의 통과 스펙트럼의 변화를 보여준다. 그림 6은 하이브리드 필터와 FRMZI가 연결된 구조에서 $\Delta L1:\Delta L2:\Delta L3$ 간의 비율을 1:2:5로 유지하면서 $20\mu\text{m} \leq \Delta L1 \leq 32\mu\text{m}$, $40\mu\text{m} \leq \Delta L2 \leq 64\mu\text{m}$, $100\mu\text{m} \leq \Delta L3 \leq 160\mu\text{m}$ 로 각각의 경로차를 7단계로 가변시켰을 때의 스펙트럼 변화를 보여준다.

그림 5와 그림 6을 살펴보면, 필터의 경로차들을 증가시키기에 따라 통과 스펙트럼의 최대 부분이 점점 단파장쪽으로 이동해 가는 것을 볼 수 있으며, 이를 통하여 총 파장 가변 범위 $\Delta\lambda$ 가 약 50nm 인 연속적인 파장 가변을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 1의 파장 가변 필터로서 Sagnac 필터만을 사용한 기존의 방법[2]에서는 필터의 FSR이 약 30nm 이지만 FWHM이 무척 넓어서 다음단에 autotracking 필터를 사용하였음에도 불구하고 링 레이저의 단일모드 발진이 불안정하였고 이로인하여 연속적인 파장 가변범위가 몹시 적었음(약 4nm)을 보고하고 있다.

6. 제안된 필터들의 경로차 구현 방안

Sagnac 필터에서 요구되는 경로차를 구현하기 위해서는 LiNbO₃ 또는 폴리머 등과 같이 큰 복굴절(Birefringence) 특성을 가지는 물질로 만들어진 위상변조기(Phase modulator)를 Sagnac 루프내에 위치시키므로써 가능하다. 편광조절기를 사용하여 위상변조기의 양쪽으로 입력되는 빛의 편광이 위상변조기의 fast축과 slow축에 각각 일치하도록 직교 편광으로 만들어 입력시키면 위상변조기의 복굴절성에 의하여 위상변조기를 지나는 동안 양방향간에 경로차가 발생하게 된다.

또 다른 방법으로는 Sagnac 루프를 모두 편광유지 광섬유로 구성하고 루프내의 적당한 곳에 반파장 지연기(half-wave retarder)와 위상변조기를 위치시켜도 동일한 결과를 얻을 수 있다. 단 이때는 Sagnac 루프내로 입사되는 빛의 편광이 편광유지 광섬유의 slow 축 또는 fast 축 중의 하나와 일치되어야 한다.

위상변조기를 사용하여 경로차를 많이 변화시키기 위해서는 위상변조기에 인가되는 외부 전압의 변화에 따른 복굴절의 변화량이 크던지 또는 위상변조기의 길이가 충분히 길면 가능하다. 폴리머 제조기술의 발달 속도로 미루어 볼 때 위의 경로차 변화를 얻는 것이 아주 어려운 일은 아니라고 사료된다. 또한 위상변조기의 빠른 응답속도(100ns 이하)를 이용하면 고속으로 경로차를 가변시킬 수 있으므로 수십 MHz 이상의 고속 파장 가변도 가능하다. 기존의 방식들은 파장을 가변시키기 위한 방법으로 기전적(mechatronic)인 요소들을 사용하였기 때문에 비록 가변 범위가 더 넓을 수는 있지만(100nm 내외) 가변 속도에 있어서 한계(대략 20KHz)에 부딪히곤 한다[7].

마하젠더 간섭계 구조에서 필요한 경로차를 구현하기 위해서는 간섭계의 양쪽 팔 중에 한쪽 팔에는 광 지연선(Optical Delayline)을 사용하고 다른 팔에는 편광조절기와 위상변조기를 사용하여 두 팔간의 광 경로차를 가변시킬 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 광대역 파장 가변 필터의 구조를 새로이 제안하였으며, 시뮬레이션을 통하여 약 $\Delta\lambda = 50\text{nm}$ 의 연속적인 파장 가변을 얻을 수 있음을 보였다.

제안된 구조의 필터를 Sagnac 필터만을 사용하는 경우와 비교해 볼 때 파장 가변 범위가 3배에 이르면서도 FWHM가 1/2로 줄어든 통과 스펙트럼 특성을 얻을 수 있었다. 이는 링 레이저의 광대역 파장 가변 및 안정적인 단일모드 발진을 더욱 가깝게 하는 중요한 특성이다.

또한 응답속도가 매우 빠른 electro-optic 위상변조기를 사용하여 경로차를 가변시키므로 수백 MHz 이상의 고속 파장 가변도 가능할 것이다.

※ 본 연구는 광주과학기술원 초고속광네트워크 연구센터를 통한 한국과학 재단 우수연구센터, 강원대학교 EFRC 및 BK21의 일부 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. W. Song, S. A. Havstad, D. Starodubov, "40nm-Wide Tunable Fiber Ring Laser With Single-Mode Operation Using a Highly Stretchable FBG", *IEEE Photonics Tech. Letters*, Vol. 13, No. 11, pp.1167-1169, November 2001.
- [2] Chang-Seok Kim, Fatima N. Farokhrooz, and Jin U. Kang, "Electro-optic wavelength-tunable fiber ring laser based on cascaded composite Sagnac loop filters", *Optics Letters*, Vol. 29, No. 14, pp1677-1679, July 15, 2004.
- [3] Chien-Hung Yeh, Sien Chi, "A broadband fiber ring laser technique with stable and tunable signal-frequency operation", *Optics Express*, Vol. 13, No. 14, July 2005.
- [4] Shenghong Huang, Yan Feng, Guanshi Qin, "Single Frequency Ytterbium Fiber Laser From Linear Cavity with Loop Mirror Filter", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 43, No. 10B, pp.L1379-L1381, 2004.
- [5] Chien-Hung Yeh, Ming-Ching Lin, Sien Chi, "Stabilized and wavelength-tunable S-Band erbium-doped fiber ring laser with singlelongitudinal-mode operation", *Optics Express*, Vol. 13, No. 18, September 2005.
- [6] Jung Ryul Lee, "Implementation of Wavelength Tunable Fiber Ring Laser for Optical Network System", *Doctoral dissertation*, pp.50-53, 2004.
- [7] W. Y. Oh, S. H. Yun, G. J. Tearney, and B. E. Bouma, "Wide Tuning Range Wavelength-Swept Laser With Two Semiconductor Optical Amplifiers", *IEEE Photonics Tech. Letters*, Vol. 17, No. 3, pp.678-680, March 2005.