

극미세선폭 단일모드 FBG 고리구조 공동 DFB 레이저

김준원[†] · 진용욱

경희대학교 전자정보학부

Ⓣ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

최규남

Texas A&M 대학교 CEMDAS 연구소

College Station, TX77843-3253, U.S.A.

(2002년 1월 24일 받음, 2002년 4월 11일 수정본 받음)

본 논문에서는 고리구조 FBG 공동과 DFB 레이저를 결합하여 kHz 대의 극미세선폭 레이저광을 발생시키는 새로운 방법을 제안하였다. 외부 FBG와 DFB 레이저내의 Bragg 격자로 이루어진 긴 공동내에 고리구조를 형성함으로써 레이저 선폭을 압축시키는 방법을 사용하였다. 손실을 최소화하면서 모드홉핑이 일어나지 않는 최대 광궤환량을 유지하기 위하여 광회전기와 가변광감쇄기를 사용하였다. 이 방법의 타당성을 검증하기 위하여 63 km의 광섬유 지연선로를 사용한 자기헤테로다인 측정장치를 사용하여 레이저 선폭을 측정할 결과 자기헤테로다인 측정장치의 해상도 한계인 3 kHz 이하의 선폭을 얻었다. 이는 2×10^{-8} nm의 선폭에 해당한다.

주제어 : linewidth, distributed feedback laser, fiber Bragg grating.

I. 서 론

최근의 통신채널의 고밀도화 추세와 고감도 광센서에 대한 요구가 많아짐에 따라 단일 주파수를 갖는 극미세선폭 레이저가 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 및 코히런트 광센서 등에의 응용 가능성으로 인하여 각광을 받고 있다. 파장분할 다중화 광통신 분야에서는 현재 사용되고 있는 1530 nm에서 1565 nm까지의 C-Band에서 광원의 선폭이 좁을수록 사용할 수 있는 광통신 채널수를 증가시킬 수 있기 때문에 더 좁은 선폭의 광원을 개발하기 위한 노력이 진행중이다. 이러한 고밀도 파장분할 다중화(DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) 광통신에 사용될 수 있는 광원으로는 광섬유 레이저를 사용하여 증폭된 자연방출광(ASE: Amplified Spontaneous Emission)으로 부터 특정 채널에 해당되는 파장만을 필터링하여 이를 외부변조 시키는 방법이나, 채널간격에 해당하는 주파수로 Mode-locking된 반도체레이저로 SC(Super-continuum) 광대역 파장을 발생시킨 후 이를 AWG(Arrayed-waveguide Grating) 등으로 필요한 대역폭 만큼 특정 채널에 해당되는 파장만을 필터링하여 이를 외부변조 시키는 방법^[1,2] 등이 있다. 그러나 이러한 방식은 사용되는 파장대역 필터의 대역폭 특성이 최소 채널간격의 한계로 작용되는 단점이 있었다. 또한 채널간격을 좁게할수록 광출력이 역비례하여 감소되는 단점이 있었다. 그러나 발생된 광출력 스펙트럼에서 필요 파장대역만을 필터링하는 수동적인 방법외에 발생하는 광파장대역을 압축시켜 축소시키는 능동적인 방법을 사용한다면 파장대역 필터의 대역폭특성의 한계보다 훨씬 더 좁은 선폭을

얻을 수 있으며 광출력이 대폭 약화 되는것을 피할 수 있게 될것이다. 이러한 목적으로 Er^{+3} 이온이 도핑된 광섬유를 이용한 광섬유 레이저를 이용한 여러가지 기법을 사용하여 발생하는 모드를 압축하여 단일모드의 미세 선폭 레이저광을 발생시키는 기법^[3,4]이 발표된 바 있다. 또한 코히런트 광센서에서도 광출력이 감지거리에 결정적인 역할을 하기 때문에 필요 파장대역만을 필터링하는 수동적인 방법보다는 발생하는 광파장대역을 압축시켜 축소시키는 능동적인 방법이 선호되고있다.

반도체 레이저를 직접 이용하는 경우 DFB(Distributed Feedback) 레이저의 선폭은 일반적으로 >10 MHz(10^{-4} nm 이상)이므로 이를 광섬유레이저와 상호 Injection-locking 시켜 1.5 MHz 선폭을 얻는 방법^[5]이 발표된 바 있다. 본 논문에서는 DFB 레이저의 이러한 선폭 한계를 극복하기 위하여 고리구조 FBG(Fiber Bragg Grating) 공동과 DFB 레이저를 결합하여 레이저 선폭을 압축시키는 방법을 사용하여 kHz 단위의 극미세선폭을 얻는 방법에 대하여 연구하였다.

본 논문의 2장에서는 FBG 고리구조 공동 DFB 레이저를 사용한 극미세선폭 레이저에 대하여 설명하고, 3장에서는 제작된 극미세선폭 레이저를 사용하여 측정할 결과에 대하여 설명하였고, 4장에서는 실제 측정된 결과를 논하는 결론으로 끝맺음하였다.

II. 극미세선폭 FBG 고리구조 공동 DFB 레이저

반도체 레이저를 펌프광으로 이용하여 Er^{+3} 광섬유내에서 레이저 선폭을 압축시키는 간접적인 방법이 많이 사용되고 있으나, 반도체 레이저를 직접 선폭 압축 메커니즘에 참여시키는 직접적인 방법으로 Injection-locking 방법이 단일모드를 얻을

[†]E-mail: jkim2100@naver.com

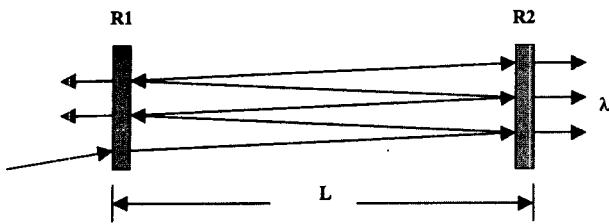


그림 1. Fabry-Perot 간섭계로서의 레이저 공진기.

수 있고, 진폭강도 변조나 위상변조시 chirping을 줄일 수 있기 때문에 많은 관심을 모으고있다. 이러한 이유로 포화흡수체와 같이 사용하여 광펄스를 축소하는 방법도 제시⁶⁾된 바 있다. 일반적인 DFB 반도체 레이저는 10 MHz 이상의 선폭을 가지고 있기 때문에 이 선폭을 압축하기 위해서는 반도체 레이저내의 증폭매질을 압축 메커니즘에 참여시켜야 한다. 레이저의 선폭과 공동길이와의 관계는, 그림 1과 같은 Fabry-Perot 공동 레이저에서의 파장폭에 관한 다음 식 (1)과 같이⁷⁾ 나타내어진다.

$$\Delta\lambda_{FWHM} = \frac{c^2}{2\pi\lambda^2 L} |\ln(\sqrt{R_1 R_2})| \quad (1)$$

여기서 R_1 과 R_2 는 공동 거울의 반사도를 나타내며 C 는 공동 내에서의 광속을 나타낸다. 이 식에서 공동의 거리 L 이 클수록 방출되는 레이저광의 파장폭을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

위와 같은 레이저에서 방출되는 광의 파장폭은 그림 2와 같이 광경로상에 $\Delta\lambda_{filter}$ 의 좁은 파장대역 특성을 갖는 필터를 삽입하여 손실 $V(\lambda)$ 을 야기함으로써 방출되는 광의 파장폭을 더욱 줄일 수 있다. 이때 필터가 증폭매질의 외부에 있지않고 내부에 있을 경우 광증폭 과정에서의 비직선성으로 인하여 필터 효과가 더욱 효과적으로 되어진다. DFB 반도체 레이저의 경우에는 이 필터가 증폭매질 내에 위치함으로써 효율적으로 파장폭이 줄어들게 된다. 그러나 그림 1과 같은 두개의 거울로 이루어진 공진기에서는 공동내에서 정재파광(Standing Light)이 SHB(Spatial Hole Burning)을 야기하면 인접 모드가 중앙 모드보다 커져 모드 건너뛰(mode hopping) 현상이 일어나 레이저 동작이 불안정 하게 되므로 이에 대한 방지책을 마련하여야 한다.

따라서 그림 3에 도시된 것과 같은 FBG 공동 DFB 레이저의 기본구조는, 레이저 공동의 길이를 늘려 파장폭을 줄이기 위해서 광섬유 지연선로를 공동내에 설치하고, 공동의 한쪽거울 대신 $\Delta\lambda_{filter}$ 의 좁은 파장대역 특성을 갖는 광섬유격자(FBG: Fiber Bragg Grating) 필터를 삽입하여 손실 $V(\lambda)$ 을 야

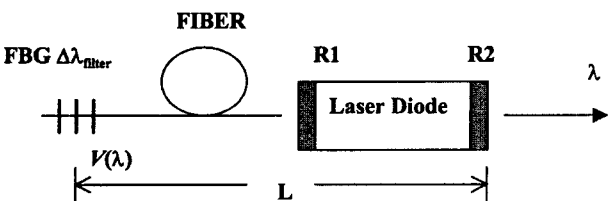


그림 2. 격자를 사용하여 파장폭을 줄인 레이저 공진기.

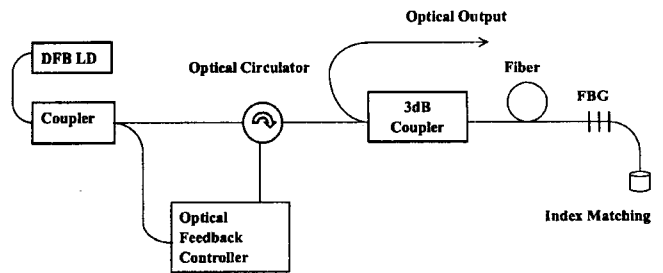


그림 3. 극미세선폭 FBG 공동 DFB 레이저의 기본구조.

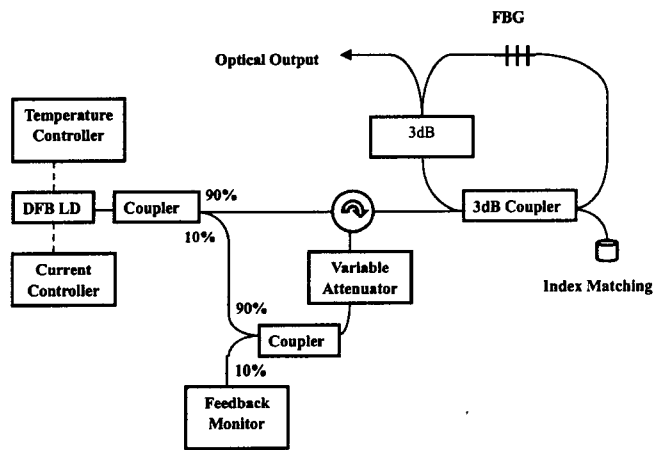


그림 4. FBG 고리구조 공동 DFB 레이저.

기함으로써 방출되는 광의 파장폭을 더욱 줄이고, 공동의 다른 한쪽거울에는 DFB 레이저 다이오드를 사용하여 증폭매질의 역할과 내부의 Bragg 격자(Grating)로 인하여 또다른 손실을 야기함으로써 파장폭 축소에 추가로 기여하도록 한 것이다. 그러나 두개의 격자(Grating)로 이루어진 공동내에서 정재파광이 형성되어 SHB(Spatial Hole Burning)를 야기하면 단일모드 동작이 이루어지지 않으므로 광제한조절기를 사용하여 제한되는 광의 양을 적정범위로 조절할 필요가있다.

본 연구에서 제안된 그림 4와 같은 고리구조 공동(Ring Cavity) DFB 레이저는 고리구조의 FBG를 레이저 공진에 참여시키므로 레이저 공진기의 공동이 길어지는 효과가 있고 공진기의 광도파 경로가 여러가지가 되어 광섬유격자가 보다 효율적으로 손실매체로 작용할 수 있게되어 파장폭을 추가로 더 압축할 수 있게한 구조이다. 이 구조에서 공진을 위하여 제한되는 광제한량을 조절하기 위하여 광회전기(Optical Circulator)와 가변광감쇄기를 사용하여 SHB가 일어나지 않는 범위내에서 제한되는 광의 양을 최대로 조정하였다. 이때 제한되는 광의 양을 모니터 하기 위하여 두개의 10%/90% 탭커플러(Tap Coupler)를 사용하는 구조로 하였다. 가변광감쇄기가 0dB 감쇠일때 DFB 레이저로부터 방출되는 광의 2.25% 만이 제한되게 하였다. 제한되는 광의 양을 추가로 줄이기 위해서는 광가변감쇄기의 감쇄량을 증가 시키면 된다. 제한되는 광의 양을 모니터하는 Feedback Monitor 에 표시되는 광제한량은 가변광감쇄기가 0dB 감쇠일때 DFB 레이저로부터 방출되는 광의 최대 2.5% 만이 제한되므로 표시되는 양의 90%가 실제 광제한

환양이 된다. 여기서 사용하지 않는 광섬유 포트에서 광이 반사되어 단일모드 동작을 방해 하는 것을 방지하기 위하여 광섬유 끝단을 굴절율정합액에 합침시킨다. 고리구조 FBG 공동 내에서 효율적인 공진이 일어나기 위해서는 레이저 공진기의 양쪽 거울이 정합되어야 하는데 이를 위해서는 사용되는 외부 광섬유격자의 중심반사파장이 DFB 레이저의 발진 중심파장과 일치하는것이 필요하다. 따라서 외부광섬유 격자의 중심 반사파장을 DFB 레이저의 통상 동작온도에서의 발진파장과 일치시키고, DFB 레이저는 동작온도가 변화되어 발진파장이 변경되지 않도록 설정된 동작온도에서 작동될 수 있도록 온도조절기를 사용하여 온도를 일정하게 유지시켜준다. 외부 광섬유격자도 온도가 변화되면 중심 반사파장이 변화되므로 외부온도 변화에 대한 영향을 차단할 수 있는 보온용기내에 설치한다.

본 실험에서는 DFB 레이저는 AT&T사의 Model 225를 사용하였고, FBG는 측정된 DFB 레이저의 발진 중심파장과 일치하는 3 M사의 대기온도 섭씨 23.5도에서 중심파장이 1531.32 nm이고 3 dB 파장폭이 0.99 nm이며 반사광/투과광의 비가 50 dB인 것을 사용하였다. FBG는 온도변화가 중심반사파장을 변화시키는 요인중 약 95%를 차지하므로 FBG는 온도를 일정하게 유지시켜 주는것이 필요하다. 3 M사의 FBG는 외부온도가 섭씨 1도 증가시 중심파장이 0.01 nm 길어지므로^[8] 외부온도가 45도 변화시 중심파장이 0.45 nm 이동하게 되고, 변화가 10% 이내에 들기 위해서는 섭씨 4.5도 이내로 온도변화가 이루어 지도록 유지시켜 주면 된다.

레이저 공진기내에 고리구조 FBG 를 삽입하여 손실을 증가시키면 파장폭을 압축시키는데는 효과적이지만 압축효과에 반비례하여 광출력을 감소시키게된다. 이렇게 발생된 극미세선폭 레이저의 파장폭을 측정하기 위해서는 일반적인 광스펙트럼분석기로는 해상도가 약 0.1 nm에 불과하여 kHz대의 극소미세선폭을 측정할 수 없으므로 고해상도를 갖는 그림 5와 같은 자기헤테로다인(self-heterodyne) 측정장치^[14]를 사용하여 측정하였다. 이 측정방식은 입력광의 위상이나 주파수의 변동폭을 Mach-Zehnder 형식의 광간섭계에서 진폭변화로 변화시켜 스펙트럼 분석기로 해독할 수 있게 한 방식이다. 즉 광간섭계 내에서 입력광신호는 자신과 동일하나 광지연선로에서 지연된 광신호와 고속 수광소자에서 만나게 된다. 이때 수광소자에서 입력광의 선폭은 광전변화된 수신전류의 전력스펙트럼으로 바뀌어 나타나게 된다. 이때 수신된 신호중에 포함된 직류성분을 제거하고 일반 스펙트럼분석기를 사용할 수 있게 하기 위하여 EO 변조기에 고주파 변조신호 ω_m 를 인가하여 광전변화된 수신전류의 전력스펙트럼을 고주파 변조신호 ω_m 만큼 이동시켜 스펙트럼분석기에 나타나게한다. 이때 광섬유지연선로의 길이는 측정하고자 하는 입력광의 코히런스시간(coherence time) 보다 길게하여 충분한 해상도를 갖게한다. 이 측정방식의 한계는 해상도를 좋게하기 위하여 지연선로의 길이를 증가시키면 지연선로의 길이가 너무 길어지고 여기에서 발생하는 광전송손실이 크게되어 비현실적이 된다. 광지연선로의 길이가 코히런스시간보다 같거나 짧을 경우 간섭전계의 위상변화가 부분적으로 교차관계(correlated)를 갖게 되기 때문에 해석이 어려워지게된다. 그림 6(a)에 제작된 FBG 고리구조 공동

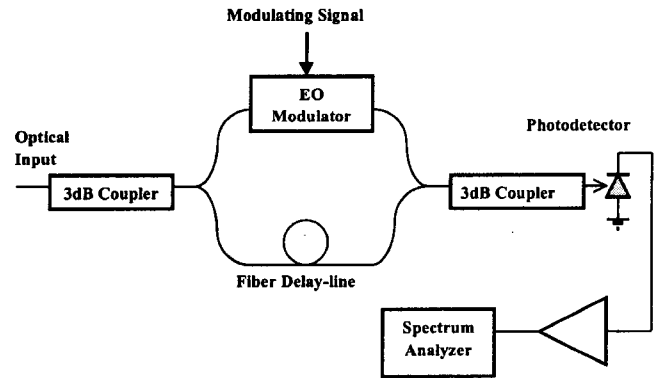
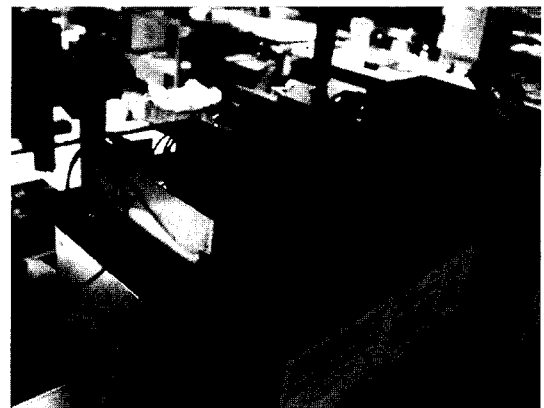


그림 5. 파장폭 측정에 사용된 자기-헤테로다인 측정장치 구성도.



(a)



(b)

그림 6. (a) FBG 고리구조 공동 DFB 레이저, (b) 자기-헤테로다인 측정장치.

DFB 레이저를, 그림 6(b)에 자기-헤테로다인 측정장치를 찍은 사진을 나타내었다.

III. FBG 고리구조 공동 DFB 레이저 선폭 측정

고리구조 FBG 공동내에서 레이저 선폭을 압축시키기 위하여 삽입된 고리(Ring) 구조의 FBG가 광출력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 레이저 구동전류와 광출력의 관계를 측정하

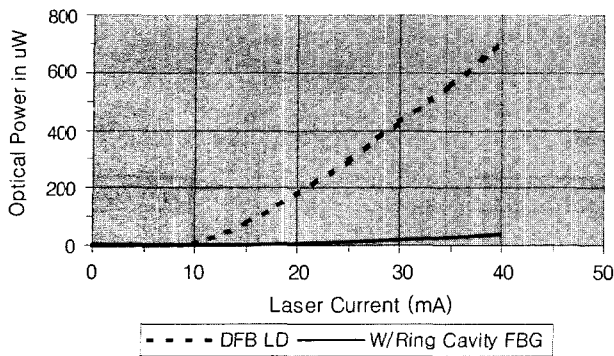


그림 7. 고리구조 FBG 공동 레이저와 DFB 레이저의 전류 대 광출력 특성.

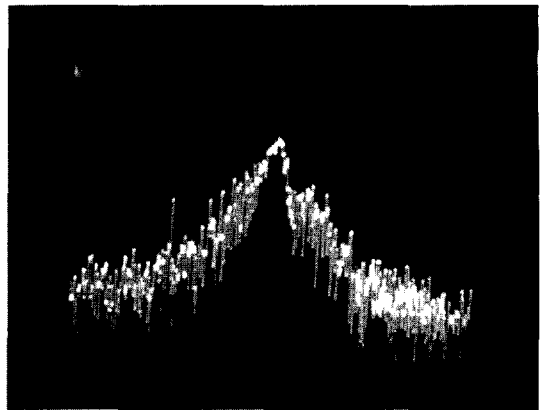
였다. 사용된 DFB 레이저는 구동전류가 40 mA일때 광출력은 710 μW이었다. 그림 7에 나타난 그래프와 같이 고리구조의 FBG 를 레이저 공동에 삽입시 출력은 원래의 DFB 레이저의 광출력과 비교하여 4.8%로 감소하였다. 이는 선폭이 20 kHz 인 FBG 만을 삽입한 경우의 출력효율 4%와 선폭이 3 kHz 이하인 흡수손실매체를 FBG 공동내에 도입한 경우의 0.5% 와⁶⁾ 비교하여 광출력면에서 고리구조 FBG가 보다 더 효율적임을 알 수 있다.

이 레이저 공동내에서의 손실분이 DFB 레이저의 선폭을 축소 시키는데 이용되므로 그 영향을 측정하였다. 그림 4의 가변 광감쇄기의 감쇄량을 아주 크게하여 케환량이 없게 하면 이는 DFB 레이저가 단독으로 있는 경우와 마찬가지로 되어 레이저의 선폭이 수십 MHz가 될것이다. 가변 광감쇄기의 감쇄량을 적게하면 케환량이 커져서 SHB(Spatial Hole Burning) 현상이 일어나 레이저에 모드건너뛰(mode hopping) 현상이 일어나 단일모드에서 다중모드로 레이저로 바뀌며 레이저의 작동이 불안정하게 될것이다. 따라서 본 실험에서는 가변 광감쇄기를 조정하여 레이저의 광케환량을 조절함으로써 모드건너뛰 현상이 일어나지 않으면서 레이저 선폭이 최소가 되는점을 찾았다. 표 1에 광케환량과 선폭과의 관계인 측정치를 나타내었다.

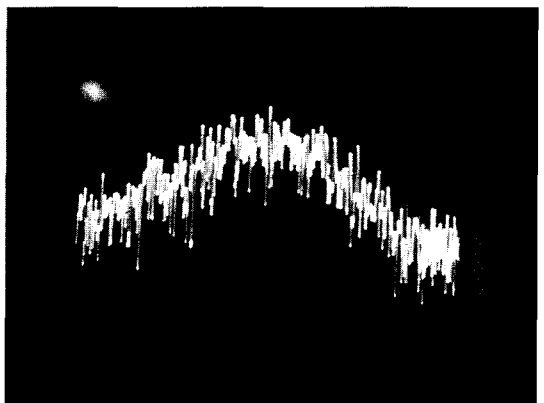
DFB 레이저의 구동전류를 40 mA에 고정하고 가변 광감쇄기의 감쇄량을 조절하여 케환량을 모니터링하는 광출력계가 0.3 μW를 가리킬때 그림 8(a)와 같이 3 dB 기준으로 3 kHz 이하의 선폭을 얻을 수 있었다. 이는 케환량이 당초출력의 0.04% 일때이다. 이 주파수로 표시되는 FSR 선폭을 식 (2)에 대입하여 파장폭으로 환산하면 2×10^{-8} nm의 3dB 파장폭에 해당한다. 이 결과는 그림 3에 나타난 FBG 공동 DFB 레이저의 기본구조로 부터 발생되는 그림 8(b)에 나타난 3 dB 기준으로 20 kHz인 선폭⁶⁾과 비교하면 8배이상 레이저 선폭에 대한 압축효과가 있음을 알 수 있다.

표 1. FBG 고리구조 공동 DFB 레이저에서의 광케환량과 선폭과의 관계

광케환율	0.01%	0.02%	0.04%	0.08%
3 dB 선폭	5 kHz	3 kHz	< 3 kHz	3 kHz
10 dB 선폭	15 kHz	8 kHz	5 kHz	10 kHz
20 dB 선폭	35 kHz	20 kHz	10 kHz	20 kHz



(a)



(b)

그림 9. FBG 공동 DFB 레이저의 자기헤테로다인 측정장치로 부터의 스펙트럼; (a) 고리구조 FBG 공동 레이저, 수평축 = 5 kHz/div, 수직축 = 10 dB/div, (b) 기본구조 FBG 공동 레이저, 수평축 = 10 kHz/div, 수직축 = 10 dB/div.

$$FSR = \frac{1}{\tau} = \frac{c_{mat}}{l_c} = \frac{c_{mat}}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \ln 2 \frac{\lambda_c}{|\Delta\lambda_{FWHM}|}} \quad (2)$$

식 (2)에서 τ_c 는 코히런스시간, l_c 는 코히런스거리, c_{mat} 는 매질에서의 광속, λ_c 는 레이저의 중심발진파장, $\Delta\lambda_{FWHM}$ 은 3 dB 파장폭을 각각 나타낸다.

여기서 자기헤테로다인 측정장치의 해상도는 광섬유지연선로의 길이에 비례하는데 측정에 사용된 지연선로의 길이는 63 km이므로 이는 315 μsec의 지연시간에 해당한다. 이를 주파수로 환산하면 3.17 kHz가 된다. 따라서 이 측정장치의 해상도 한계인 3.17 kHz 보다 좁은 선폭은 자기헤테로다인 측정장치에서 출력되는 레이저광의 위상관계가 교차관계(correlated)를 갖으므로 측정결과 해석이 어려워짐을 의미한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고리구조 FBG 공동과 DFB 레이저를 결합하여 kHz대의 극미세선폭 레이저광을 발생시키는 새로운 방법을 제안하였다. 일반 DFB 레이저의 선폭은 일반적으로 >10 MHz(10^{-4} nm 이상)이므로 이를 외부 FBG와 DFB 레이저내

의 Bragg 격자로 이루어진 긴 공동내에 고리구조를 형성하여 레이저 선폭을 압축시키는 방법을 사용하였다. 손실을 최대화 하면서 모드건너뛰(mode hopping)이 일어나지 않는 최대 광케환량을 유지하기 위하여 광회전기와 가변광감쇄기를 사용하였다. 이렇게 만들어진 FBG 공동 DFB 레이저에서 발생하는 레이저광을 63 km의 광섬유 지연선로를 사용한 자기헤테로다인 측정장치를 사용하여 레이저 선폭을 측정한 결과 자기헤테로다인 측정장치의 해상도 한계인 3kHz 이하의 선폭을 얻었다. 이는 2×10^{-8} nm의 선폭에 해당한다. 측정에 사용된 63 km 길이의 광섬유지연선로를 갖는 자기헤테로다인 측정장치의 해상도가 3 kHz이므로 실제 발생하는 레이저광의 선폭은 해상도 한계인 3 kHz 이하의 선폭인 것으로 생각된다. 이때 고리구조 FBG 공동 레이저의 출력효율은 원래 DFB 레이저의 광출력과 비교하여 4.8%이었다. 이는 선폭이 20 kHz인 FBG 만을 삽입한 경우의 출력효율인 4%와, 선폭이 3 kHz 이하인 흡수 손실매체를 FBG 공동내에 도입한 경우의 출력효율인 0.5%와 비교⁶⁾하면 레이저 선폭 압축을 대비 광출력면에서 고리구조 FBG가 보다 더 효율적임을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Y. Takushima and K. Kikuchi, "10-GHz over 20-channel

multiwavelength pulse source by slicing super-continuum spectrum generated in normal-dispersion fiber," *IEEE Phot. Tech. Lett.*, vol. 11, no. 3, pp. 322-324, 1999.
 [2] S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, I. Shake, and K. Mori, "3 Tbits/s(160Gbit/sx19channel) optical TDM and WDM transmission experiment," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 10, pp. 826-827, 1999.
 [3] K. Hotate and T. Ito, "Fiber ring resonator with stable eigenstate of polarisation using twisted singlemode optical fiber," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp. 923-924, 1996.
 [4] W. H. Loh, B. N. Samson, L. Dong, G. J. Cowle, and K. Hsu, "High performance single frequency fiber grating-based erbium:ytterbium-codoped fiber lasers," *J. Light-wave Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 114-118, 1998.
 [5] L. W. Liou, M. Yu, T. Yoshino, and G. P. Agrawal, "Mutual injection locking of a fibre laser and a DFB semiconductor laser," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 1, pp. 41-42, 1995.
 [6] J. W. Kim, Y. O. Chin, and K. N. Choi, "Ultra-narrow linewidth FBG cavity DFB laser with saturable absorber," submitted for publication, 2002.
 [7] R. Menzel, *Photonics* (Springer-Verlag, New York, 2001), pp. 390.
 [8] B. Jennings *et al.*, "3M Optical components program," unpublished, 2001.

Ultra-narrow linewidth single frequency DFB laser with FBG ring cavity

Joon Won Kim[†] and Yong Ohk Chin

School of Electronics and Information, Kyunghee University, Kyunggido 449-701, KOREA

[†]E-mail: jkim2100@naver.com

Kyoo Nam Choi

Center for Electronic Materials, Devices and Systems, Texas A&M University, College Station, TX77843-3253, U.S.A.

(Received January 24, 2002 ; revised manuscript received April 11, 2002)

A novel ultra-narrow linewidth DFB laser in the extended FBG ring cavity having kHz linewidth is presented. The method of linewidth compression was realized by introducing an extended fiber ring cavity into the cavity between the external FBG and the Bragg grating inside a DFB laser diode. Optimum optical feedback control was achieved by using an optical circulator and a variable optical attenuator to prevent mode hopping induced by spatial hole burning. To prove the validity of the proposed scheme, a self-heterodyne measurement set-up with fiber delay line of 63 km was utilized for the ultra-narrow linewidth measurement. A 3 dB linewidth of less than 3 kHz was demonstrated, which is resolution limited performance. This linewidth is equivalent to 3 dB linewidth of 2×10^{-8} nm.

Classification Code : FO.020.