

광섬유 브래그 격자를 이용한 단일 종모드 단방향 광섬유 레이저

이정찬 · 전영민 · 김명욱 · 김봉규 · 이상배 · 김상국 · 최상삼

한국과학기술연구원 광기술연구센터

이상선

한양대학교 전파공학과

(1999년 3월 19일 받음, 1999년 5월 6일 수정본 받음)

광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating)와 서큘레이터(circulator)를 이용하여 좁은 선폭의 단일 종모드로 발진하는 단방향 어븀첨가 광섬유 레이저를 간결하게 구성하였다. 이 레이저에서 발진되는 단일 종모드의 선폭은 마하젠더 간섭계를 이용한 delayed self-heterodyne 검출 방법을 사용하여 측정하였고, 측정된 선폭은 5 kHz였다. 단일 종모드로 발진되는 최대 광출력은 2.7 mW였으며, 발진 중심파장은 1548 nm였다.

I. 서 론

단일 종모드로 발진하며 좁은 선폭을 갖는 광섬유 레이저는 간섭형(coherent) 광통신, 광 계측 기기, 그리고 분광기 등에 활용될 수 있는 중요한 기술이다. 현재까지 다양한 구조의 광섬유 레이저로부터 좁은 선폭, 단일 종모드의 광원을 얻기 위한 연구들이 진행되고 있다. 선형 공진기의 길이를 짧게 하여 반사경 및 파장필터의 역할을 하는 광섬유 격자의 반사 대역폭에 비하여 모드 간격을 충분히 넓게 함으로써 좁은 선폭을 얻는 방법,^[1] 어븀첨가 광섬유에 직접 브래그 격자를 새긴 분산배환(distributed feedback, DFB) 광섬유 레이저를 구성하여 단일 종모드 얻는 방법^[2-4]들이 있다. 한편, 선형공진기의 구조를 갖는 레이저에서 발생하는 공간적 홀버닝(spatial hole burning)효과를 제거하여 선폭을 줄이기 위해서 단방향 고리 형태의 레이저에 Fabry-Perot 필터를 사용하거나,^[5,7] 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating)를 추가하여 파장 가변의 기능을 첨가시킨 단방향 광섬유 고리형 레이저가 발표된 바 있다.^[8,9] 이러한 여러 형태의 레이저 공진기 구성은 여기 광원의 출력 대 레이저의 출력 비율, 즉, 기율기 효율, 발진 파장의 조절 범위, 레이저 공진기의 손실, 공진기 내의 편광문제, 모드 hopping 등의 문제점들을 해결하면서 동시에 좁은 선폭의 단일 종모드 동작을 위해서 제안되었다.

따라서 본 실험에서는 간결한 구조의 공진기를 이용하여 좁은 선폭의 단일 종모드 발진을 연구목적으로 광섬유 브래그 격자의 투과광을 레이저의 출력으로 사용하는 단방향 진행 어븀첨가 광섬유 레이저를 제작하였다. 레이저의 단일 종모드 발진 상태와 발진된 종모드의 선폭 측정은 마하젠더 간섭계를 이용한 delayed self-heterodyne 방법을 사용하였으며 측정된 선폭은 5 kHz였다.

II. 레이저 구성

그림 1은 서큘레이터와 광섬유 브래그 격자를 이용한 어븀

첨가 광섬유 레이저의 구성도이다. 공진기 전체의 길이는 30 m이다. 여기광원으로 980 nm의 LD(SDLO-2100-125)를 사용하였으며, 980/1550 nm WDM 광결합기를 이용하여 레이저의 이득매질로 사용되는 18 m의 어븀첨가 광섬유와 결합하였다. 사용된 어븀첨가 광섬유의 어븀 도핑 농도는 800 ppm이고, 100 mW의 펄핑광의 세기와 1550 nm의 소신호 입력과장에서 이득과 최적길이는 22 dB와 18 m로 측정되었다. 레이저의 반사경, 투과 대역 필터, 그리고 광섬유 레이저의 출력단의 역할을 하는 광섬유 브래그 격자는 1548 nm의 중심 파장에서 84%의 반사율과 0.2 nm의 반치폭(FWHM)을 가졌다. 이 광섬유 격자는 발진 파장을 조절할 수 있을 뿐만 아니라, 광섬유 격자의 좁은 대역 투과폭으로 인한 mode hopping 효과를 어느 정도 제거할 수 있는 특성을 가지고 있다.^[10] 한편, 한방향 발진을 위하여 서큘레이터가 사용되었다. 어븀첨가 광섬유에서 나오는 시계방향의 빛은 서큘레이터에서 차단되는 반면, 반시계 방향의 빛은 서큘레이터를 통하여 광섬유격자로 진행한다. 그리고, 광섬유 격자에서 반사된 빛은 서큘레이터의 3번 단을 통과하여 어븀첨가 광섬유를 지나게 된다. 따라서 공진기 내의 빛이 한쪽 방향으로만 진행된다. 이 한방향 발진은 공간적 홀버닝 효과를 제거하게 된다. 그리고, 광섬유형 편광 조절기(polarization controller)를 공진기 내에 삽입하여 레이저 출력이 최적화 되도록 편광 상태를 조절하였다.

그림 2는 레이저의 출력력을 광스펙트럼 분석기(ANDO, AQ-

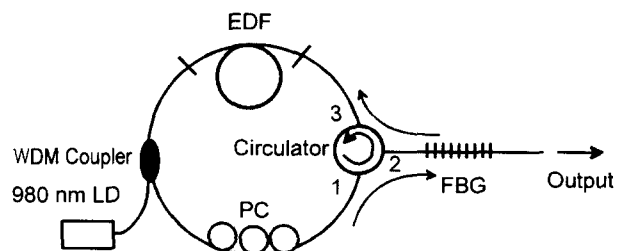


그림 1. 어븀첨가 광섬유 레이저의 구성도. EDF: Er³⁺-doped fiber, FBG: fiber Bragg grating, PC: polarization controller.

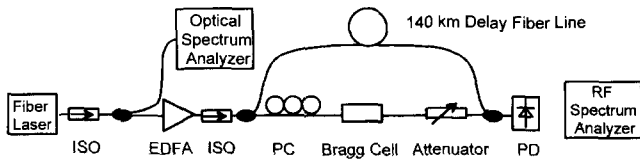


그림 2. 마하젠더 간섭계를 이용한 delayed self-heterodyne 검출 방법의 구성도. EDFA : Er³⁺-doped fiber amplifier, PC : polarization controller, PD : photo-detector, ISO : isolator

6315A)로 측정된 결과이다. 레이저의 발진 중심파장은 1548 nm이고, 레이저 선폭(FWHM)은 광스펙트럼 분석기의 분해능과 같은 0.05 nm로 관측되었으므로, 실제 레이저 선폭은 그보다 작은 값으로 추정된다. 레이저의 문턱값(threshold pumping power)은 7 mW였으며, 펌핑 광의 세기가 40 mW 이하에서는 안정된 출력 광스펙트럼을 나타내는 단일모드로 발진되었다. 펌핑광의 세기가 40 mW 이상인 경우에는 레이저의 출력 광스펙트럼에서 다른 모드들이 발진되어 다중모드 레이저의 특성을 가졌다.

III. Delayed-self heterodyne 간섭계를 이용한 선폭측정

광스펙트럼 분석기를 이용하여 0.01 nm 이하의 레이저 선폭측정은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서와 같이 단일모드 레이저의 실험에서는 더욱 정밀한 선폭측정 장치가 필요하게 된다. 본 연구에서는 레이저의 발진 선폭을 정밀하게 측정하기 위하여 광섬유 마하젠더 간섭계를 이용한 delayed self-heterodyne^[11] 검출 방법을 사용하였다. 광섬유 마하젠더 간섭계를 이용한 delayed self-heterodyne 검출 방법은 그림 3과 같이 한쪽 경로에는 광지연선을 사용한다.

광섬유 지연선의 길이(L)에 의한 지연시간(t_d)이 광섬유 레이저의 코히어런트 시간(τ_c)보다 충분히 길게 하였을 경우(t_d/τ_c = ∞), 마하젠더 간섭계에서 출력되는 광신호의 출력 스펙트럼은 다음과 같이 나타난다.

$$S_{i_d}(\Omega)_{t_d \gg \tau_c} = \frac{2S^2 I_0^2}{\pi} \left[\frac{\left(\frac{4}{\tau_c}\right)}{\left(\frac{2}{\tau_c}\right)^2 + \Omega^2} + 4\pi\delta(\Omega) \right] \quad (1)$$

여기서 Ω는 주파수, S는 광검출기의 감도, I₀는 레이저 출력 세기이다. 출력 스펙트럼은 4πδ(Ω)의 DC성분과 Ω=0를 중심으로 Lorentzian 분포함수를 가지는 성분으로 구성되어진다. 그리고, Lorentzian 분포 함수의 선폭은 다음과 같이

$$(\Delta\Omega)_{FWHM} = \frac{4}{\tau_c} = 2(\Delta\omega)_{laser} \quad (2)$$

레이저 선폭의 두 배로 나타난다.

따라서, 레이저의 코히어런트 시간 보다 간섭계의 지연시간을 충분히 길게(t_d/τ_c=∞)하여 RF 스펙트럼의 선폭(ΔΩ)을 측정하면 레이저 선폭을 측정할 수 있다. 한편, delayed self-heterodyne 검출 방법의 선폭측정 분해능은

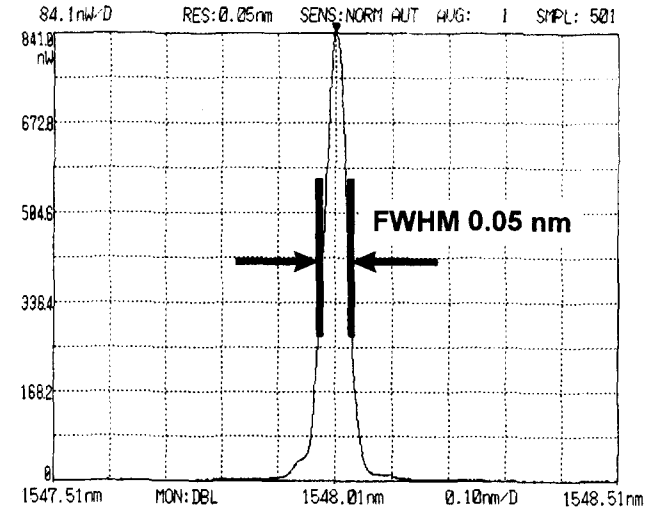


그림 3. 레이저의 출력 광 스펙트럼.

$$(\Delta\omega)_{res} = \frac{c}{2nL} \quad (3)$$

로 나타난다. 여기서, c는 진공상태에서 빛의 속도이고, n은 매질의 굴절률이다.

그러나, 일반적인 RF 스펙트럼 분석기는 입력 신호가 전혀 없는 경우에도 주파수 '0' 근처에서 분석기의 잡음이 출력된다. 이 효과를 없애기 위하여 간섭계의 한쪽 경로를 지나는 빛의 주파수를 변환시킨다. 이때, 출력되는 간섭계의 스펙트럼은 주파수 변환량 만큼 중심이 이동하게 된다. 따라서, 이동된 주파수를 중심으로 출력되는 스펙트럼의 선폭을 측정하면, RF 스펙트럼 분석기의 잡음이 제거된 레이저의 선폭만을 측정할 수 있다.

본 연구에서 제작한 단일 종모드 레이저의 선폭을 측정하기 위하여 구성된 self-heterodyne 간섭계는 그림 3과 같다. 간섭계의 한쪽 경로에 RF 스펙트럼 분석기의 잡음 영향을 없애기 위하여 브래그 셀(Bragg cell)을 이용하여 빛의 주파수를 55 MHz 변환시켰다. 또한, 두 광경로 간의 광출력을 같게 하기 위하여 광감쇄기(optical attenuator)와 최적의 간섭이 일어나도록 편광조절기를 삽입하였다. 그리고, 다른쪽 경로에는 140 km의 광섬유 지연선을 설치하여 0.7 kHz의 분해능을 가진다. 한편, 광섬유 지연선을 지난 빛이 많은 손실을 가지므로, 광신호를 증가하여 간섭계 입력단에 어블침가 광섬유 증폭기를 연결하였고, 광섬유 레이저의 출력단과 어블침가 광섬유 증폭기의 출력단에는 광고립기(optical isolator)를 삽입하여 검출기들로부터 불필요한 반사들을 억제하였다.

그림 4는 레이저의 출력을 마하젠더 간섭계와 RF 스펙트럼 분석기로 측정된 결과이다. 그림 4(a)는 단일 종모드가 출력될 때 RF 스펙트럼 모양으로, 여기 광원의 출력이 7 mW 일 때 레이저가 발진하여 40 mW 미만 일 때까지 한 개의 모드만 출력되었다. 한편, 여기 광세기가 40 mW 이상이 되면 그림 4(b)와 같이 여러 모드가 발진되어 다중 종모드 레이저가 된다. 이처럼 발진 모드의 수를 조사하면서 동시에 광스펙트럼 분석기로 레이저의 출력 광스펙트럼을 관찰 해보면, 모드의 수

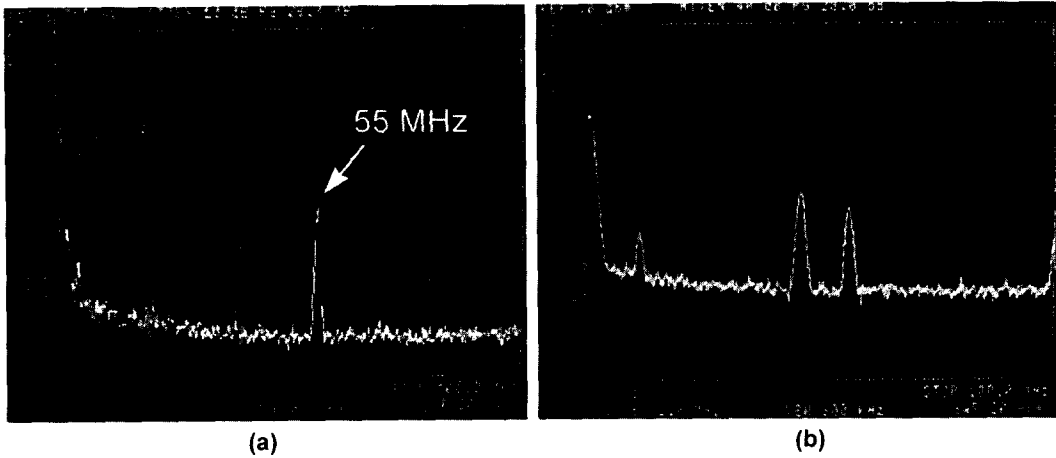


그림 4. 마하젠더 간섭계에서 출력되는 레이저의 RF 스펙트럼. (a) 단일 종모드 발진 ($P_{pump} = 27$ mW) (b) 다중 종모드 발진 ($P_{pump} = 46$ mW).

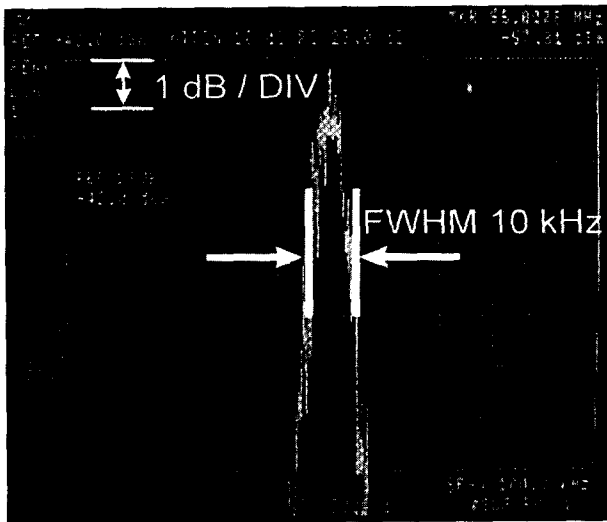


그림 5. Delayed self-heterodyne 검출 방법을 이용한 단일 종모드 발진 레이저의 RF 스펙트럼 (측정된 레이저의 선폭 : 5 kHz).

가 증가할수록 출력 광스펙트럼 모양이 안정되지 못함을 관측할 수 있었다.

그림 5는 단일 종모드의 RF 스펙트럼(그림 4의 a)을 주파수 55 MHz에서 확대하여 측정한 결과이다. 간섭계에 의한 RF 스펙트럼의 측정된 반치선폭(FWHM)은 10 kHz로서 수식 (2)에 의한 레이저의 실제 반치선폭은 5 kHz이다. 이때 RF 스펙트럼 분석기의 sweep time과 분해 대역폭(resolution bandwidth)은 각각 50 sec, 300 Hz이다. 50 초간의 시간동안 반복적으로 흔들림 없는 동일 스펙트럼을 관측할 수 있었던 것은 단일 종모드 발진 레이저의 안정성을 판단하는데 기준으로 볼 수 있다.

레이저의 또 다른 특성인 여기 광원의 출력에 따른 레이저 출력의 변화특성은 그림 6과 같다. 이 특성은 단일 종모드로 출력될 때 특성으로서, 여기 광원의 출력에 따른 레이저 출력의 기울기 효율은 8.8% 이고, 단일 종모드 발진 상태에서의

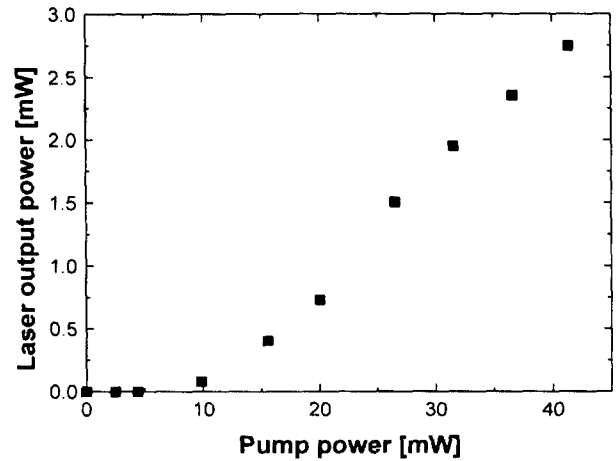


그림 6. 단일 종모드 발진 레이저의 여기 광세기에 따른 광출력 변화특성. 기울기 효율 : 8.8%, 문턱 여기 광원 출력 : 7 mW.

레이저의 최대 출력은 2.7 mW이다.

레이저가 완전한 단일 종모드 동작 상태에서 여기 광원의 출력에 의한 RF 스펙트럼 선폭은 미약한 변화를 보이며, 간섭계의 앞부분에 설치한 어블림첨가 광섬유 증폭기에 의하여 RF 스펙트럼 선폭이 넓어지는 현상은 관찰되지 않았다. 앞선 결과들로부터 본 연구에서 광섬유 레이저 주변환경의 온도나 기계적인 흔들림에 의한 영향과 공진기 내의 편광에 의한 영향들을 고려한다면 더욱 안정된 발진 선폭을 얻을 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 연구논문에서는 광섬유 브래그 격자와 서큘레이터를 이용하여 간결하게 공진기를 구성하여 1548 nm의 발진 중심과장에서 단일 종모드 발진과 좁은 선폭 특성을 갖는 단방향 어블림첨가 광섬유 고리형 레이저에 관한 연구를 하였다. 단일 종모드로 발진하는 레이저의 최대출력은 2.7 mW, 여기 광원의 출력 대 레이저 출력의 기울기 효율은 8.8%, 그리고, 발진 선폭은 5 kHz였다.

참고문헌

- [1] M. Zuern, J. Voigt, E. Brinkmeyer, E. Ulrich and S. B. Poole, *Opt. Lett.* **12**, 316 (1987).
- [2] M. Sejka, P. Varming, J. Hubner and M. Kristensen, *Electron. Lett.* **31**, 1445 (1995).
- [3] J. L. Zyskind, V. Mizrahi, D. J. Digiovanni and J. W. Sulhoff, *Electron. Lett.* **28**, 1385 (1992).
- [4] 윤홍, 권서원, 강성철, 김성철, 이정찬, 이상배, 최상삼, 조규만, *Photonics Conference '98*, 363, (1998).
- [5] K. Iwatsuki, H. Okamura and M. Saruwatari, *Electron. Lett.* **26**, 2033 (1990).
- [6] H. Schmuck, T. Pfeiffer and G. Veith, *Electron. Lett.* **27**, 2117 (1991).
- [7] J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, Y. Sun, J. Stone L. W. Stulz, G. T. Harvey, D. J. Digiovanni, H. M. Presby, A. Piccirilli, U. Koren and R. M. Jopson, *Electron. Lett.* **27**, 2148 (1991).
- [8] J. J. Pan and Y. Shi, *Electron. Lett.* **31**, 1164 (1995).
- [9] H. H. Lee, G. P. Lees and T. P. Newson, *Electron. Lett.* **34**, 1318 (1998).
- [10] G. J. Cowle and D. N. Payne, *Electron. Lett.* **27**, 229 (1991).
- [11] A. Yariv, *Optical Electronics*, 4th Ed., Chap. 10 (1991).

Single-longitudinal-mode unidirectional fiber laser using fiber Bragg grating

Jyung Chan Lee, Young Min Jhon, Myong-Wook Kim, Bong Kyu Kim,
Sang Bae Lee, Sang Kuk Kim and Sang Sam Choi

Photonics Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea

Sang Sun Lee

Department of Radio Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received March 19, 1999, Revised manuscript received May 6, 1999)

We have constructed a narrow-linewidth single-longitudinal-mode unidirectional Er^{3+} -doped fiber laser using a fiber Bragg grating incorporated by a three port optical circulator with a compact configuration. Using a conventional delayed self-heterodyne detection technique with Mach-Zehnder interferometer a linewidth of 5 kHz was measured. In a single-longitudinal-mode operation, output power of up to 2.7 mW at 1548 nm were obtained for a launched pump power of 43 mW at 980 nm.