

편광 유지 광섬유 루프 거울을 이용한 고리형 반도체-광섬유 레이저에서의 다파장 발전

유봉안, 이병호
서울대학교 전기공학부

Multiwavelength generation in semiconductor-fiber ring laser using a polarization maintaining fiber loop mirror

Bong-Ahn Yu and Byoung-ho Lee
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 고리형 반도체-광섬유 레이저 공진기 안에 높은 복굴절률을 가지고 있는 편광 유지 광섬유 루프 거울을 삽입하여 새로운 구조의 다파장 발전 시스템을 제안하고 구현하였다. 이득 매질인 반도체 광 증폭기의 특성으로 인해 실온에서 파장 간격이 1 nm 이내인 22 개의 파장의 빛을 발전시킬 수 있었다.

1. 서 론

최근 정보 전송량의 급속한 증대로 광통신 시스템에 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM) 방식이 도입되면서 다파장 광원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 사용되고 있는 방법으로는 물리적으로 분리된 레이저들로부터 얻어지는 서로 다른 파장의 빛들을 하나의 광섬유로 결합시켜 내보내는 방식이 있다 [1,2]. 그러나, 이 방법은 각 파장별로 이득 매질과 파장 선택기, 광 변조기 등을 요구하므로 그 구조가 복잡하고 비경제적이다. 이로 인해 다른 방법으로 하나의 레이저로부터 여러 파장의 빛을 동시에 얻는 방식이 주목을 받고 있다 [3]. 본 논문에서는 고리형 반도체-광섬유 레이저(Semiconductor-Fiber Ring Laser, SFRL)를 구성하고 고리 공진기 내에 높은 복굴절률을 가지고 있는 편광 유지 광섬유(Polarization Maintaining Fiber, PMF) 루프 거울 [4]을 삽입하여 다파장의 빛을 생성하였다. 보통 광섬유 레이저에는 이득 매질로 어븀 첨가 광섬유(Erbium-Doped Fiber, EDF)가 사용되는데, 이 매질은 homogeneous broadening에 의한 이득 상호 포화로 동시에 여러 파장의 발전이 어려워 파장 간격 1 nm 이내에서 다파장 발전을 위해서는 액화 질소 등으로 냉각시킨 상태에서 사용해야 하는 어려움이 있다 [5]. 반면에 SFRL의 이득 매질인 반도체 광 증폭기(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)는 그 특성이 inhomogeneous broadening하므로 실온에서 동시에 1 nm 이내의 간격으로 여러 파장의 발전이 이루어진다. 그리고, 제안된 시스템에서는 발전 파장들을 결정하는 필터로서 PMF 루프 거울을 사용함으로써 Mach-Zehnder 간섭 필터 등에 비해 보다 안정적이며 그 제작이 간단하다는 장점을 가지고 있다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

그림 1은 연구에 사용된 실험 구성도를 보여 주고 있다. SFRL의 구성 소자는 출력 가변 광섬유 커플러, 편광 제어기(Polarization Controller, PC), 광 고립기, 그리고 PMF 루프 거울이다. 이득 매질로 사용된 SOA(Alcatel사 1901)는 길이가 1 mm, 운반자 수명이 2 ns 정도이고 양변에 반사율이 $10^3 \sim 10^4$ 정도가 되도록 무반사 박막증착되었으며, 200 mA의 최대 펄핑 전류에서 약 23 dB의 fiber-to-fiber 이득과 7.5 dBm 정도의 포화 출력 파워를 가지고 있다.

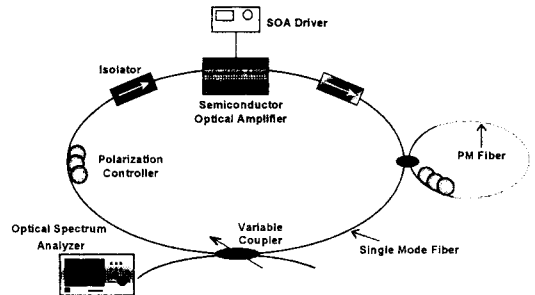


그림 1. 편광 유지 광섬유 루프 거울을 이용한 다파장 발전 고리형 반도체-광섬유 레이저의 실험 구성도

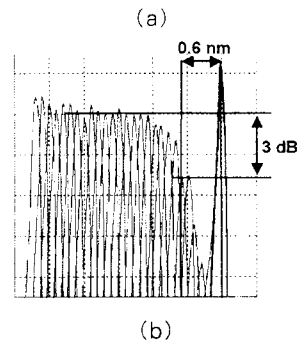
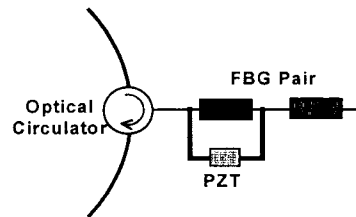


그림 2. (a) 광섬유 브래그 격자 pair, (b) SFRL의 두 발전 파장의 파워 변화

이 SOA의 homogeneous broadening 선폰을 측정하기 위해서, 본 연구진은 PMF 루프 거울 대신에 반사 파장이 1 nm 이상 차이 나는 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating, FBG) 두 개를 직렬로 연결한 다음 광 순환기와 함께 삽입한 다음, 단파장의 FBG에 일정한 스트레인을 가하였다(그림 2.(a)). 이 레이저는 스트레인이 가해지기 전에는 거의 같은 파워로 두 파장에서 발전하다가, 스트레인이 가해짐에 따라 즉, 두 발전 파장의 간격이 좁혀짐에 따라 한쪽 파장의 파워가 줄어들게 된다. 파장 간격이 0.6 nm 정도 되었을 때, 그 파

위가 3 dB 줄어들었다(그림 2.(b)). 따라서, 이 SOA는 실은 상태에 있을 때, 1550 nm 대역 근방에서 homogeneous broadening 선폭이 대략 0.6 nm 정도임을 알 수 있다. 이에 비해, EDF의 homogeneous broadening 선폭은 같은 조건에서 수 nm 정도이므로, SOA 대신에 EDFA를 사용한다면, 이 레이저는 파장 간격 1 nm 이내에서는 여러 파장이 동시에 안정적으로 발진하지 못한다.

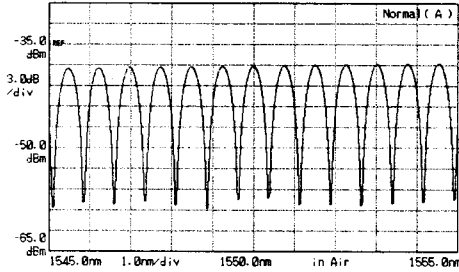


그림 3. PMF 루프 거울 광 투과 스펙트럼

PMF 루프 거울은 2×2 광섬유 커플러(50:50), PMF, 그리고 PC로 구성되며, 그 원리는 다음과 같다. 광섬유 커플러의 한 쪽 포트에 입사한 빛은 시계 방향으로 진행하는 빛과 반시계 방향으로 진행하는 빛으로 나뉜 다음, 같은 경로를 지나서 다시 광섬유 결합기에서 만나게 된다. PC는 진행하는 빛들의 편광 상태를 회전시키는 일을 하므로, PMF 부분을 지날 때 각 빛의 편광 상태는 다르게 된다. 따라서, 두 빛이 광섬유 결합기에서 다시 만날 때, PMF의 복굴절률과 길이에 비례하는 위상 지연이 생겨나서 파장에 따른 간섭 현상이 일어난다. 즉, PMF 루프 거울은 Mach-Zehnder 간섭계와 같은 필터 특성을 보이는 일종의 빗살 무늬 필터(comb filter)가 되며, 그 파장 간격은 다음과 같이 주어진다 [4].

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2 |n_s - n_r| L_{PMF}}$$

여기에서, L_{PMF} 는 PMF의 길이, n_s 와 n_r 는 각각 PMF의 slow 축과 fast 축 방향으로 편광 상태인 빛들이 겪게 되는 굴절률이다. 그림 3은 PMF의 길이를 7m 정도 했을 때 제작된 PMF 루프 거울의 광 투과 스펙트럼을 보여 주고 있다. 이때, 투과 파장 즉, 발진 파장간의 간격은 약 0.8 nm이다. 위 식에서 보는 바와 같이 투과 파장간의 간격은 PMF의 길이를 조절하여 변화시킬 수 있다. 또한, 투과 스펙트럼의 빛 강도 패턴은 Mach-Zehnder 필터와 마찬가지로 \sin^2 에 비례하는 모양을 가지고 있으며, 투과율은 루프 내의 PC를 조절하여 바꿀 수 있다. 이와 같이 PMF 루프 거울 필터는 Mach-Zehnder 간섭 필터와 같은 특성을 보이지만, 전자는 두 빛의 경로가 같기 때문에, 후자에 비해 외부 섭동의 영향을 덜 받아 보다 안정적인 특성을 보여준다.

2.2 실험결과 및 논의

그림 4는 SOA의 펌핑 전류가 180 mA일 때, CW로 발진하는 SFRL의 광 출력 스펙트럼을 보여주고 있다. 실온에서 22 개의 파장이 동시에 신호 대 잡음비 20 dB 이상으로 발진하는 것을 볼 수 있다. 발진 파장의 수와 각 파장에서의 파워 분포는 SOA의 펌핑 전류 및 이득 스펙트럼과 PMF 루프 미러 투과 스펙트럼의 모양, 그리고 공진기 내부의 편광 상태에 따라 달라지게 된다. SOA의 펌핑 전류를 위 값으로 고정시키고, 공진기 내의 PC와 루프 내의 PC를 조절하였을 때, 발진 파장의 수를 15~22 개로 변화시킬 수 있었다. 그림 5는 이 레이저의 각 파장별로 출력 파워의 안정성을 보기 위

해 주기적으로 그 광 출력 스펙트럼을 주사한 것이다. 각 파장의 파워는 1 dB 이하 정도의 진폭으로 불안정한 특성을 보이는데, 이는 광섬유 공진기를 구성할 때 각 광섬유 커넥터 단에서의 반사, 공진기 전체의 Lyot 필터 효과 [6]에 의한 것이다.

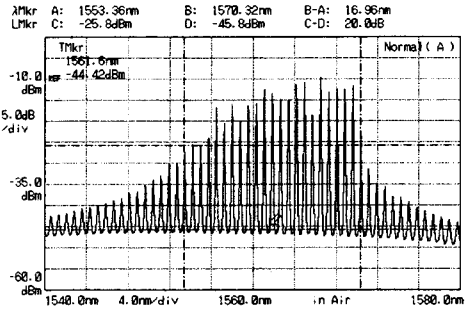


그림 4. SFRL이 22 개의 CW 파장 발진할 때의 광 출력 스펙트럼

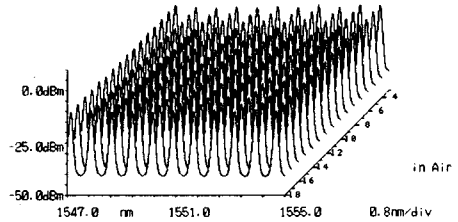


그림 5. 광 출력 스펙트럼의 주기적인 주사

다른 요인으로 동일한 파장 간격에 의한 four-wave mixing(FWM) 효과를 생각할 수 있다. 이를 알아보기 위해 앞서 SOA의 homogeneous broadening 선폭 측정 실험에서와 같이 PMF 루프 거울 대신에 0.8 nm 파장 간격을 갖는 FBG pair를 삽입한 다음, 발진 파장 양쪽의 FWM 신호 파워를 측정하였다. 그림 6은 이때의 광 출력 스펙트럼을 보여 주고 있다. 이로부터 FWM 신호의 파워가 발진 파장의 파워에 비해 40 dB 이상 작다는 것을 볼 수 있으므로, FWM 효과는 이 시스템 출력에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 추정할 수 있다.

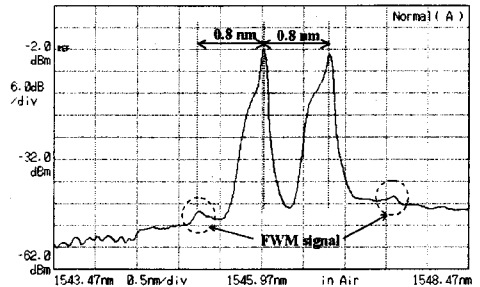


그림 6. SFRL에서의 FWM 영향

3. 결 론

본 연구 내용을 요약하면, 고리형 반도체-광섬유 레이저에 편광 유지 광섬유 루프 거울을 삽입함으로써, 실온에서 파장 간격이 0.8 nm인 22 개의 파장의 빛을 발진시킬 수 있는 새로운 형태의 다파장 발진 레이저를 구현하였다. 이 레이저 시스템은 광섬유 공진기 안에 이득

매질로 EDF 대신에 SOA를 사용함으로써, 실온에서 파장 간격이 1 nm 이내에서도 다파장 발진이 가능하였다. 발진 파장 간격은 PMF의 길이를 조절하여 바꿀 수 있다. 발진 파장을 결정하는 comb 필터로 PMF 루프 거울을 사용함으로써, 동일한 필터 스펙트럼 특성을 보이는 Mach-Zehnder 간섭 필터에 비해 보다 안정적인 출력을 얻을 수 있다. 또한, 공진기 내의 PC와 루프 내의 PC를 조정하여 발진 파장의 수를 변화시킬 수 있다.

(참 고 문 헌)

[1] I. H. White, "A multichannel grating cavity laser for wavelength division multiplexing applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 9 no. 7, pp. 893-899, 1991.
[2] H. Takahashi, H. Toba, and Y. Inoue, "Multiwavelength ring laser composed of EDFAs and

an arrayed-waveguide wavelength multiplexer," *Electronics Letters*, vol. 30 no. 1, pp. 44-45, 1994.
[3] K. Vlachos, K. Zoiros, T. Houbavlis, and H. Avramopoulos, "10×30 GHz pulse train generation from semiconductor amplifier ring laser," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12 no. 1, pp. 25-27, 2000.
[4] X. P. Dong, S. Li, K. S. Chiang, M. N. Ng and B. C. B. Chu, "Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a high-birefringence fibre loop mirror," *Electronics Letters*, vol. 36 no. 19, pp. 1609-1610, 2000.
[5] N. Park and P. F. Wysocki, "24-line multiwavelength operation of erbium-doped fiber ring-laser," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8 no. 11, pp. 1459-1461, 1996.
[6] W. Demtroder, *Laser Spectroscopy*, pp. 178-182, 1982