

편광 유지 광섬유에 새겨진 장주기 격자를 이용한 어븀 첨가 광섬유 레이저의 파장 스위칭

이용욱, 이병호  
서울대학교 전기공학부

Wavelength Switching of Erbium-Doped Fiber Laser using Long-Period Fiber Grating Written on a Polarization-Maintaining Fiber

Yong Wook Lee and ByoungHo Lee  
School of Electrical Engineering, Seoul National University

**Abstract** - 편광 유지 광섬유에 새겨진 장주기 격자의 파장에 따른 편광 의존 손실을 이용하여, 광섬유 브래그 격자가 사용된 광섬유 레이저에서 공동 내부 빛의 편광을 회전시킴에 따라, 발진 파장의 스위칭 및 이중 파장 발진이 가능함을 보였다.

1. 서론

광섬유 레이저는 파장 분할 다중화 광통신 시스템, 광섬유 센서, 그리고, 광학 장비나 시스템의 진단 등에 저비용으로 사용될 수 있는 광원이다. 광섬유 레이저에서 파장 선택 필터로 사용되는 광섬유 브래그 격자 (Fiber Bragg Grating: FBG) 는 광섬유와의 호환성, 사용의 편리성, 저가의 장점 등으로, 광섬유 레이저의 내부 공동 (intracavity) 소자로서 이상적이다. 이러한 FBG를 내부 공동 소자로 사용하는 광섬유 레이저에서 발진되는 파장을 스위칭하기 위해서 여러 가지 기법들이 제시되어 왔다. FBG쌍을 이용하여 공동 (cavity) 을 형성하는 방식 [1], 복굴절이 큰 광섬유에 FBG를 제작하여 내부 공동 소자로 사용하는 방식 [2] 그리고 두 FBG 사이에 공동 이득 매질을 사용하여 중복되는 공동을 형성하는 방식 [3] 등이 발진 파장 스위칭을 위해 제시된 기법들이다. 본 논문에서는 편광 유지 광섬유 (polarization-maintaining fiber: PMF) 에 제작된 장주기 격자 (long-period fiber grating: LPG) 를 이용하여 [4,5], 두 FBG를 내부 공동 소자로 사용한 어븀 첨가 광섬유 (Erbium-doped fiber: EDF) 레이저에서, 광섬유 레이저 공동 내부의 빛의 편광 상태에 따라 발진 파장의 스위칭 및 이중 파장 발진이 가능함을 보였다.

2. 본론

2.1 이론 및 실험

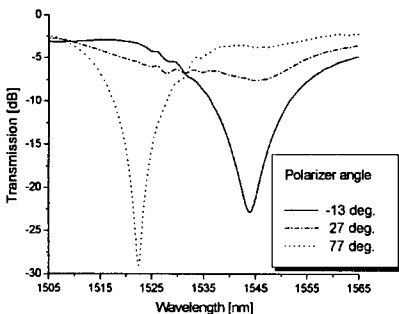


그림 1. PM-LPG의 파장에 따른 PDL

그림 1은 PMF에 새겨진 LPG (PM-LPG) 의 파장에 따른 편광 의존 손실 (polarization-dependent

loss: PDL) 을 나타내고 있다. 그림에서 파장에 따른 손실 곡선은 선형 편광기의 각도에 따라 변하고 있다. 특히 두 직교 편광에서 두 공진 파장 (1522.5, 1544 nm) 이 발생한다는 것을 알 수 있다. PM-LPG는 248 nm의 KrF 엑시머 레이저를 480 μm의 크기 (amplitude) 마스크에 통과시켜, 100 °C, 100 bar에서 약 5 일간 수소 처리된 PANDA형의 PMF (복굴절: 5.05x10<sup>-4</sup>) 에 LPG를 새김으로써 제작되었다. PM-LPG의 파장에 따른 특성은 다음과 같이 간단히 설명된다. LPG의 동일 방향 모드 결합에서의 공진 파장 λ<sub>0</sub>는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\lambda_0 = [n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad}]A$$

단, n<sub>eff</sub><sup>core</sup>와 n<sub>eff</sub><sup>clad</sup>는 각각 광섬유 코어와 클래딩의 유효 굴절률이고, A는 크기 마스크의 간격 (pitch) 이다. PMF에 LPG가 제작될 경우, 위 식의 결합 조건을 만족시키는 파장들은 입력되는 빛의 편광상태에 따라 다르게 된다. 결국 이는 손실 곡선이 편광상태에 따라 나뉘게 만들며, 고정된 파장에 대해서 하나의 편광상태의 빛만이 소거되도록 만든다.

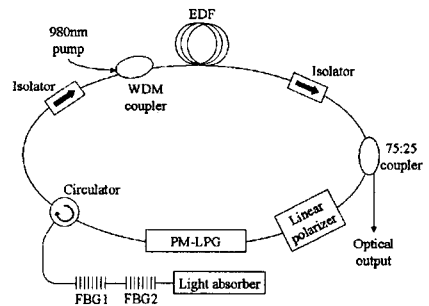


그림 2. 실험 구성도

그림 2는 제안된 광섬유 레이저의 구성도를 나타내고 있다. 고리형 공동 (ring cavity) 은 두 개의 광 고립기 (isolator) 의 역할로 한 방향으로만 빛을 순환시킨다. 그리고 450 ppm의 농도로 어븀이 첨가된 20 m의 EDF를, WDM 결합기 (coupler) 를 통하여 70 mW의 980 nm 레이저 다이오드로 펌핑 (pumping) 하여 활성 영역 (active region) 을 구성하였다. 선형 편광기 (linear polarizer) 는 PM-LPG로 입력되는 빛의 편광을 회전시켜주기 위해 사용되었다. 그리고 FBG1과 FBG2가 광 순환기 (circulator) 를 통해 레이저 공동과 연결되어 있고, 광섬유 말단에서의 프레넬 (Fresnel) 반사를 막기 위해 광 흡수기 (light absorber) 로 굴절률 정합 젤 (index matching gel) 을 사용하였다. 실험에 사용된 FBG1과 FBG2의 브래

그 파장과 3 dB 폭 그리고, 반사율 (reflectivity) 은 각각 1544, 1530.5 nm와 0.45, 0.42 nm 그리고, 90.1, 89.1 %이었다. FBG2의 브래그 파장은 PM-LPG의 손실 스펙트럼에서 발진되는 레이저의 파장 한계를 예측하기 위해, PM-LPG의 단파장 공진 주파수 (1522.5 nm) 보다 8 nm 정도 떨어뜨려 위치 시켰다. 발진되는 레이저는 75:25 결합기를 통해서 25 %가 출력되고, 이를 광 스펙트럼 분석기로 분석하였다. 제안된 광섬유 레이저의 동작원리는 다음과 같다. FBG의 브래그 반사에 의한 스펙트럼 상의 두 피크의 파장, 즉 브래그 파장은 광섬유 레이저가 발진될 수 있는 파장을 정의한다. FBG의 브래그 파장 근처 영역에서 여하한 방법으로 광섬유 레이저 공동에 PDL을 발생시켜주면, 평균 밀도 반전 (average population inversion) 과 공동 손실 (cavity loss) 간의 균형이 공동 내부의 편광 상태에 따라 조절될 수 있고, 그에 따라 발진되는 레이저의 파장과 그 수도 변할 수 있다. 따라서 선형 편광기를 제어하여 PM-LPG에 입력되는 빛의 편광 상태를 조절시켜줌으로써, 발진되는 파장을 스위칭 하는 것이 가능하다.

## 2.2 결과 및 토의

그림 3은 제안된 광섬유 레이저의 단일 발진 파장 스위칭 동작을 보여준다. 실선은 PM-LPG가 단파장 (1522.5 nm) 에서 공진 파장을 가질 때, 그리고 점선은 장파장 (1544 nm) 에서 공진 파장을 가질 때의 레이저의 발진 스펙트럼을 나타낸다. 따라서, 두 단일 파장 발진 동작은 서로 직교하는 편광들에서 각각 발생한다. 주목할 만한 사실은 PM-LPG의 단파장 영역 공진 파장에서 8 nm나 떨어진 1530.5 nm에서 레이저 발진이 일어났다는 점이며, 1531 nm의 브래그 파장을 갖는 FBG를 이용한 추가적인 실험을 통해, 1530.5 nm 이상에서는 안정적인 레이저 발진이 이루어지지 않음을 확인하였다. 따라서 제작된 PM-LPG는 FBG2의 브래그 파장이  $1522.5 \pm 8$  nm의 대역에 있을 경우 발진 파장의 스위칭을 가능하게 해주며, FBG1의 브래그 파장이 1544 nm 로 고정된다면, 스위칭 하는 두 발진 파장간의 간격은 3.5 ~ 17.5 nm 의 범위에서 조절 가능하다는 것을 알 수 있다. 특히, FBG1의 브래그 파장을 변화시키면, 스위칭하는 파장 간격을 더 넓게 혹은 좁게도 만들 수 있다.

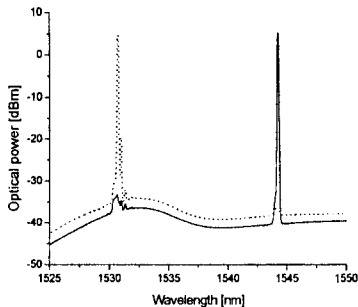


그림 3. 단일 발진 파장 스위칭 동작

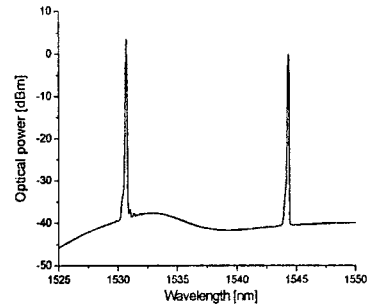


그림 4. 이중 파장 발진 동작

그림 4에서는 이중 파장 발진 동작을 나타내고 있다. 그림은 선형 편광기를 적절히 조절함으로써, 동시에 두 브래그 파장에서 평균 밀도 반전이 공동 손실보다 크도록 만들어, 이중 파장 발진이 가능함을 보여주는 것이다. 그림 5는 두 발진된 레이저 출력을 10 초 간격으로 10번 측정한 스펙트럼이다. 선형 편광기가 고정되었을 경우, 두 레이저 출력간의 상대적인 피크 파워의 변화는 거의 관측할 수 없었다. 그리고 두 레이저 출력의 크기 변화는 1 dB 이하였으며, 신호 대 증폭 자발 방출 (amplified spontaneous emission) 간의 비는 약 40 dB 이상이었다.

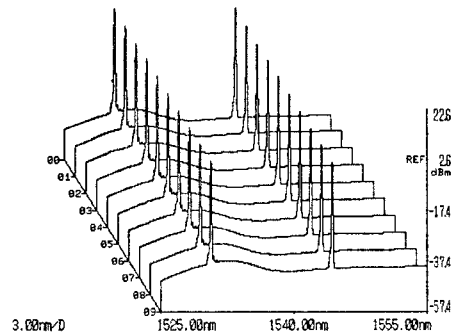


그림 5. 이중 파장 발진 동작시 시간에 따른 출력 스펙트럼

## 3. 결 론

본 논문에서는 PM-LPG의 파장에 따른 PDL을 이용하여, EDF 레이저에서 파장을 스위칭하는 기법을 제안하였다. 선형 편광기를 통해 레이저 공동의 빛의 편광을 적절히 조절함으로써, 광섬유 레이저에서 이중 파장 발진 혹은 두 단일 발진 파장간의 스위칭 동작이 가능하도록, 레이저 공동 손실과 이득과의 관계가 선택되어질 수 있음을 보였다. 더불어 제안된 구조에서, 발진 파장의 연속적인 튜닝(tuning)은 FBG의 물리적인 길이를 변화시킴으로써 그리고, 다파장 발진은 여러 방법으로 EDF의 균질 선포 확대 (homogeneous gain broadening) 에 의한 파장 불안정성을 줄임과 동시에, 다양한 빔살 필터 (comb filter) 들을 사용함으로써 얻어질 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Q. Mao *et al.*, "Switchable multiwavelength erbium-doped fiber laser with cascaded fiber grating cavities", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 14, no. 5, pp. 612-614, 2002.
- [2] J. Hernandez-Cordero *et al.*, "Fiber laser polarization tuning using a Bragg grating in a Hi-Bi fiber", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 10, no. 7, pp. 941-943, 1998.
- [3] Y. Z. Xu *et al.*, "Tunable dual-wavelength-switching fiber grating laser", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 10, no. 3, pp. 334-336, 1998.
- [4] A. S. Kurkov *et al.*, "Long-period fiber grating as a wavelength selective polarization element", Electronics Letters, vol. 33, no. 7, pp. 616-617, 1997.
- [5] B. Ortega *et al.*, "High-performance optical fiber polarizers based on long-period gratings in birefringent optical fibers", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 9, no. 10, pp. 1370-137, 1997.