

# 복굴절이 큰 광섬유에 형성된 장주기 광섬유 격자를 이용한 파장 스위칭 가능한 광섬유 고리형 레이저

論 文
56-11-20

## Wavelength-Switchable Fiber Ring Laser Employing a Long-Period Fiber Grating Inscribed on a High Birefringent Fiber

李 鎔 旭<sup>†</sup>  
(Lee Yong Wook)

**Abstract** - In this paper we propose a wavelength-switchable fiber ring laser that employs a polarization-dependent fiber band stop filter. The fiber filter was fabricated by inscribing a long-period fiber grating on a high birefringent fiber. Dual-wavelength switching operation was accomplished by controlling the rotatable linear polarizer which rotated the polarization plane of the light circulating through the fiber laser cavity. The amplitude variation of both laser lines was measured to be less than 0.5 dB and the signal-to-amplified spontaneous emission ratio was more than 55 dB.

**Key Words** : Fiber Ring Laser, Wavelength Switching, Long-Period Fiber Grating, High Birefringent Fiber, Polarization

### 1. 서 론

광섬유 레이저 (fiber laser) 는 파장 분할 다중화 (wavelength division multiplexed; 이하 WDM) 광통신 시스템, 광섬유 센서, 그리고, 광학 장비나 시스템의 진단 등에 저비용으로 사용될 수 있는 유용한 광원이다. 광섬유 레이저에서 파장 선택 필터 (wavelength-selective filter) 로 사용되는 광섬유 브래그 격자 (fiber Bragg grating; 이하 FBG) 는 광섬유와의 호환성, 전자파의 장애를 받지 않는 특성, 소형, 경량, 저가의 장점 등으로, 광섬유 레이저의 내부 공동 (intracavity) 소자로서 이상적이다. 이러한 FBG를 내부 공동 소자로 사용하는 광섬유 레이저에서 발견되는 파장을 스위칭하기 위해서 현재까지 여러 가지 기법들이 제시되어왔다. FBG 쌍을 이용하여 공동 (cavity) 을 형성하는 방식 [1], 복굴절이 큰 광섬유 (high birefringent fiber; 이하 HBF) 에 FBG를 제작하여 내부 공동 소자로 사용하는 방식 [2] 그리고 두 FBG 사이에 공동 이득 매질 (gain medium) 을 사용하여 중복되는 공동을 형성하는 방식 [3] 등이 발견된 파장 스위칭 (lasing wavelength switching) 을 위해 제시되어 온 기법들이다. 본 논문에서는 FBG와 어븀 첨가 광섬유 (erbium-doped fiber; 이하 EDF) 를 각각 내부 공동 소자와 이득 매질로 사용한 광섬유 고리형 레이저 (fiber ring laser) 를 제작하고, 제작된 광섬유 레이저의 내부 공동에 HBF에 새겨진 장주기 광섬유 격자 (long-period fiber grating; 이하 LPFG) 를 연결하여 [4,5], 레이저 공동 내부를 순환하는 빛의 편광 상태 (state of polarization) 에 따라 단일 발진 파장간의 스위칭 및 이중 파장 발진 (dual-wavelength lasing) 이 가능함을 보였다.

### 2. 이론 및 실험

그림 1은 HBF에 새겨진 LPFG (이하 HB-LPFG) 의 파장에 따른 편광 의존 손실 (polarization-dependent loss; 이하 PDL) 을 나타내고 있다. HB-LPFG는 248 nm의 KrF 엑시머 (excimer) 레이저를 480  $\mu\text{m}$ 의 진폭 마스크 (amplitude mask) 에 통과시켜, 100  $^{\circ}\text{C}$ , 100 bar에서 약 5 일간 수소 처리 (hydrogen loading) 된 팬더 (panda) 형의 HBF (복굴절:  $\sim 5.05 \times 10^{-4}$ ) 에 LPFG를 형성함으로써 제작되었다. 그림에서 파장에 따른 손실 스펙트럼 곡선은 회전 가능한 선형 편광기 (rotatable linear polarizer; 이하 RLP) 의 각도에 따라 변하고 있다. 특히 두 직교 편광 (RLP 각도:  $-11^{\circ}$ ,  $-101^{\circ}$ ) 에서 두 공진 파장 (resonant wavelength: 1522.5 nm, 1544 nm) 이 발생한다는 것을 알 수 있다.

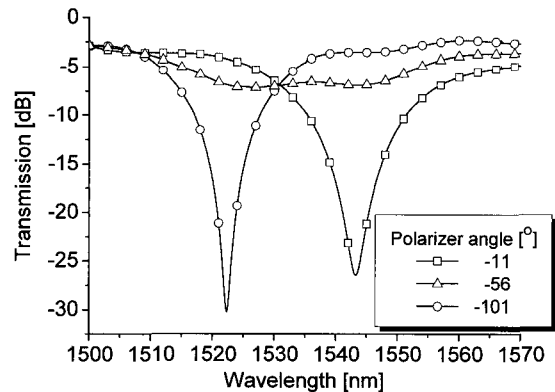


그림 1 HB-LPFG의 파장에 따라 다른 PDL 특성  
Fig. 1 Wavelength-dependent PDL of the fabricated HB-LPFG

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國電子通信硏究員 先任硏究員

E-mail : dorawoot@chol.com

接受日字 : 2007年 8月 5日

最終完了 : 2007年 8月 20日

HB-LPFG의 입력 편광에 따른 손실 스펙트럼 분리 특성은 다음과 같이 간단히 설명된다. 일반적으로 LPFG의 동일 방향 모드 결합 (codirectional mode coupling) 에서의 공진 파장  $\lambda_0$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

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

단,  $n_{eff}^{core}$ 와  $n_{eff}^{clad}$ 는 각각 광섬유 코어와 클래딩의 유효굴절률이고,  $A$ 는 진폭 마스크의 격자 간격 (grating pitch) 이다. 그런데, 입력 편광에 따라 코어를 진행하는 빛이 느끼는 유효굴절률이 달라지는 HBF에 LPFG가 제작될 경우, 위 식의 결합 조건을 만족시키는 공진 파장들은 입력되는 빛의 편광 상태에 따라 달라지는 특성이 발생한다. 결국 이러한 특성은 손실 스펙트럼 곡선이 편광 상태에 따라 나뉘게 만들며, 특정한 하나의 파장에 대해서 특정한 하나의 편광 상태의 빛은 소거되고, 그와 직교하는 편광 상태의 빛은 투과되도록 만든다.

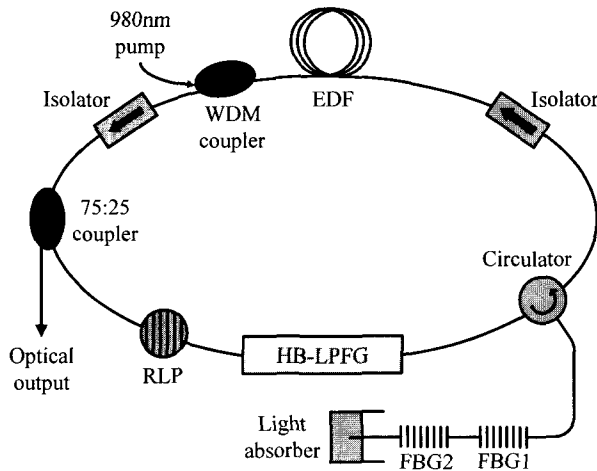


그림 2. 제안된 광섬유 고리형 레이저의 실험 구성도  
Fig. 2 Experimental setup of the proposed fiber ring laser

그림 2는 제안된 광섬유 고리형 레이저의 구성도를 나타내고 있다. 고리형 공동 (ring cavity) 은 두 개의 광 고립기 (isolator) 의 역할로 한 방향 (시계 반대 방향) 으로만 빛을 순환시킨다. 그리고 1000 ppm의 농도로 어븀 (erbium) 이 첨가된 30 m의 EDF를, WDM 결합기 (coupler) 를 통하여 200 mW의 980 nm 레이저 다이오드 (laser diode) 로 펌핑 (pumping) 하여 활성 영역 (active region) 을 구성하였다. RLP는 HB-LPFG로 입력되는 빛의 편광축 (plane of polarization) 을 회전시켜주기 위해 사용되었다. 그리고, 레이저의 발진되는 파장을 결정하는 공동 필터로서 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 브래그 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 HB-LPFG

의 손실 스펙트럼에서 소거시킬 수 있는 레이저 발진 파장의 한계를 조사해보기 위해, HB-LPFG의 단파장 공진 주파수 (1522.5 nm) 보다 8 nm 정도 떨어뜨려 위치시켰다. 레이저의 발진 출력은 75:25 결합기를 통해서 25 %가 출력되고, 이를 광 스펙트럼 분석기로 분석하였다. 제안된 광섬유 레이저의 동작원리는 다음과 같다. FBG들의 브래그 반사에 의한 스펙트럼 상의 두 피크 (peak) 의 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. 즉, 공동 내부의 편광 상태를 조절하여 두 브래그 파장 중 하나만 발진을 시킬 수도 있고, 두 파장에서 모두 발진이 일어나게 할 수도 있다. 따라서 RLP를 제어하여 HB-LPFG에 입력되는 빛의 편광 상태를 조절시켜줌으로써, 제안된 광섬유 고리형 레이저의 발진되는 파장을 스위칭 하는 것이 가능하다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 제안된 광섬유 레이저의 단일 발진 파장 스위칭 동작을 보여주고 있다. 실선은 HB-LPFG가 장파장 (1544 nm) 에서 공진 파장을 가질 때, 그리고 점선은 단파장 (1522.5 nm) 에서 공진 파장을 가질 때의 레이저의 발진 스펙트럼을 나타낸다. 즉, 두 단일 파장 발진 동작은 서로 직교하는 편광들 (-11°와 -101°) 에서 각각 발생한다. 주목할 만한 사실은 HB-LPFG의 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 HB-LPFG는 FBG2의 브래그 파장이 1522.5 ± 8 nm의 대역에 있을 경우 발진 파장의 스위칭을 가능하게 해주며, FBG1의 브래그 파장이 1544 nm로 고정된다면, 스위칭하는 두 발진 파장간의 간격은 3.5 ~ 17.5 nm의 범위에서 조절 가능하다는 것을 알 수 있다. 특히, FBG1의 브래그 파장을 변화시키면, 스위칭할 수 있는 파장 간격을 더 넓게 혹은 좁게도 만들 수 있다.

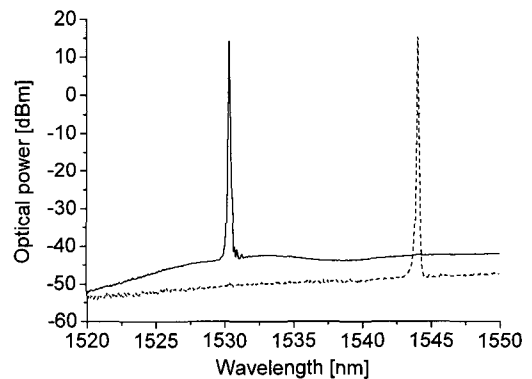


그림 3 단일 발진 파장 스위칭 동작  
Fig. 3 Single wavelength switching operation of the proposed laser

그림 4에서는 이중 파장 발진 동작을 나타내고 있다. 그림은 RLP를 적절히 조절함으로써, 동시에 두 브래그 파장에서 평균 밀도 반전이 공동 손실보다 크도록 만들어, 이중 파장 발진이 가능함을 보여주는 것이다. 그림 5는 동시에 발진되는 두 파장의 레이저 출력을 6분 간격으로 10번 측정된 스펙트럼이다. RLP가 고정되었을 경우, 두 레이저 출력간의 상대적인 피크 파워의 변화는 거의 관측할 수 없었다. 그리고 단일 파장 발진과 이중 파장 발진 동작 두 경우에서 공히, 레이저 출력의 크기 변화는 0.5 dB 이하였으며, 신호 대 증폭 자발 방출 (amplified spontaneous emission) 간의 비율은 약 55 dB 이상이었다.

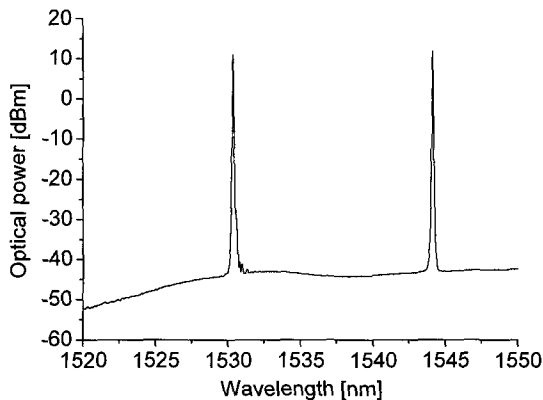


그림 4 이중 파장 발진 동작  
Fig. 4 Dual-wavelength lasing operation of the proposed laser

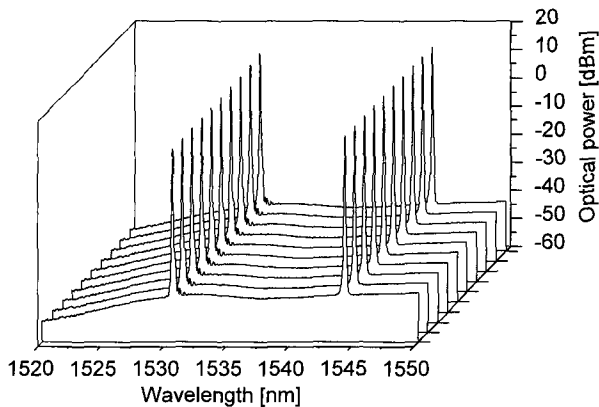


그림 5 이중 파장 발진 동작시 시간에 따른 출력 스펙트럼  
Fig. 5 Temporal dependence of the output spectra in the dual-wavelength lasing operation

#### 4. 결 론

본 논문에서는 HB-LPFG의 파장에 따라 다른 PDL을 이용하여, EDF를 이득 매질로 하는 광섬유 고리형 레이저에서 발진 파장을 스위칭하는 기법을 제안하였다. RLP를 통해 레이저 공동을 순환하는 빛의 편광 상태를 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 FBG에 인장력 (strain) 을 가해 FBG의 물리적인 길이를 변화시켜줌으로써 구현할 수 있다. 그리고, 다파장 발진은 EDF의 균질 선폭 확대 (homogeneous gain broadening) 를 줄여주면서 빔살 필터 (comb filter) 와 같은 다파장 필터를 레이저 공동 필터로 사용함으로써 얻어질 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국전자통신연구원의 "High Risk High Return Project" 사업의 일환으로 수행하였음.

#### 참 고 문 헌

- [1] Q. Mao and J. W. Y. Lit, "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, V. A. Kozlov, A. L. G. Carter, and T. F. Morse, "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, H. Y. Tam, W. C. Du, and M. S. Demokan, "Tunable dual-wavelength-switching fiber grating laser," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 334-336, 1998.
- [4] A. S. Kurkov, M. Douay, O. Duhem, B. Leleu, J. F. Henninot, J. F. Bayon, and K. Rivoallan, "Long-period fiber grating as a wavelength selective polarization element," *Electronics Letters*, vol. 33, no. 7, pp. 616- 617, 1997.
- [5] B. Ortega, L. Dong, W. F. Liu, J. P. de Sandro, L. Reekie, S. I. Tsykina, V. N. Bagratashvili, and R. I. Laming, "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.