

파장 가변 및 스위칭이 가능한 쌍파장 어블 첨가 광섬유 레이저

박상오 · 심영보 · 윤민석 · 추수호 · 김현주 · 권오장 · 한영근[†]

한양대학교 물리학과

Ⓞ 133-791 서울특별시 성동구 행당동 17

(2010년 9월 16일 받음, 2010년 9월 30일 수정본 받음, 2010년 10월 4일 게재 확정)

본 논문에서는 파장 가변과 동시에 스위칭이 가능한 쌍파장 어블 첨가 광섬유 레이저를 실험적으로 구현하였다. 희토류 첨가 광섬유를 이득 매질로 사용하고 두 개의 선형 공진기를 중첩하여 파장 스위칭 효과를 구현하였다. 음향광학 변조기로 두 레이저 발진 파장들 사이에 선택적으로 스위칭하는 기능을 가지면서 동시에 광섬유 격자에 인장력 및 수축력을 인가하여 발진 파장을 가변할 수 있는 기능성 쌍파장 광섬유 레이저를 구현하였다. 제안된 파장 가변형 쌍파장 스위칭 레이저는 높은 소광비와 가변성, 넓은 가변 대역폭, 그리고 빠른 안정응답시간 등 이전의 기술에 비해 더 좋은 장점들을 가지고 있다. 파장 스위칭을 하는 모든 경우에 대해 40 dB이상의 높은 소광비를 가지는 고성능의 광섬유 레이저를 구현하였다. 제안된 쌍파장 광섬유 레이저의 출력은 안정적이고 출력 변동은 0.6 dB 이하로 측정되었다. 발진 파장의 가변성 변화는 $\sim 7.2 \text{ nm/m}^{-1}$ 로 측정되었다.

Dual Wavelength Erbium-doped Fiber Laser with Lasing Wavelength Switchability and Tunability

Sangoh Park, Youngbo Shim, Min-Seok Yoon, Suho Chu, Hyun-Joo Kim,

Oh-Jang Kwon, and Young-Geun Han[†]

Department of Physics, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

(Received September 16, 2010; Revised manuscript September 30, 2010; Accepted October 4, 2010)

A simple technique for a flexibly tunable and switchable dual wavelength-switchable erbium-doped fiber (EDF) laser using fiber Bragg gratings is proposed and demonstrated by using both linear cavity loss controlling and homogeneous gain broadening of the EDF. The oscillating wavelength switching is successfully realized by using the modulation of the acousto-optic modulator driven by the RF signal. The wavelength spacing and lasing wavelength of the proposed wavelength-switchable laser can also be controlled by using the bending-induced tension or compression strain. The proposed tunable dual wavelength-switchable fiber laser has a lot of advantages, such as a high extinction ratio larger than 40dB and a high tunability of $\sim 7.2 \text{ nm/m}^{-1}$.

Keywords: Switchable fiber laser, Tunable fiber laser, Erbium-doped fiber laser, Fiber grating

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (060.2320) Fiber optics amplifiers and oscillators; (140.0140) Lasers and laser optics; (140.3510) Lasers, fiber

I. 서 론

다파장 광섬유 레이저는 다파장 구현, 단순한 구조, 저비용, 그리고 낮은 삽입손실 등과 같은 많은 장점을 가지고 있으므로 파장 분할 통신 시스템 및 광센서 분야에서 많은 관심을 불러일으키고 있는 기술이다^[1-10]. 파장 가변 광섬유 레이저는 광학 실험장치 테스트, 차등 흡수(differential absorption) 측정, 파장 조절 파장 분할 시스템, 광섬유 센서 등에

기술적으로 전망이 좋은 광원으로 활용성이 높아 많은 연구가 진행되고 있다. 광섬유 레이저를 이용하여 파장 변환을 구현하기 위해 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 공진기^[1-4], 편광 유지 광섬유(polarization maintaining fiber, PMF)를 이용한 다채널 필터 기술^[5-6], 마하젠더 간섭계를 이용한 광 빔살(comb) 필터 기술^[7] 등이 제안되었다. 특히 광섬유 격자는 파장 선택성, 광섬유 호환성, 사용 및 제작의 용이함, 저비용 등과 같은 많은 장점들을 가지고 있기 때문에 광

[†]E-mail: yghan@hanyang.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

섬유 격자를 기반으로 많은 광섬유 레이저 기술이 연구되고 있다⁸⁻¹⁰⁾.

본 논문에서는 파장 가변과 스위칭이 가능한 어븀 첨가 광섬유 레이저를 제안하고 실험적으로 구현하였다. 어븀 첨가 광섬유를 이득 매질로 사용하고 두 개의 선형 공진기를 중첩하고 음향광학적 변조기를 이용하여 파장을 선택적으로 스위칭할 수 있는 기능을 구현하였다. 선형 공진기의 손실을 차별화하고 어븀 첨가 광섬유의 균일한 넓은 선폭(homogenous line broadening) 효과와 음향광학적 변조기의 켜짐/꺼짐(on/off) 상태에 의해 발진 파장을 선택적으로 스위칭하였다. 공진기를 구성하는 광섬유 격자에 인장력 및 수축력을 인가하여 발진 파장을 자유롭게 조절하여 파장 가변 레이저를 구현하였다. 파장 스위칭을 하는 모든 경우에 대해 40 dB 이상의 높은 소광비를 가지는 고성능의 광섬유 레이저를 구현하였다. 광섬유 레이저의 출력 변화는 0.6 dB 이하로 측정되었다. 발진 파장의 가변성 변화는 $\sim 7.2 \text{ nm/m}^{-1}$ 로 측정되었다.

II. 파장 가변 및 스위칭 가능한 쌍파장 어븀 첨가 광섬유 레이저

그림 1은 광섬유 격자 기반 공진기 안에서의 선형 공진기 손실 조절과 어븀 첨가 광섬유 격자의 균일한 넓은 선폭 효과를 이용한 가변 쌍파장 스위칭 어븀 첨가 광섬유 레이저에 대한 개요도를 나타내고 있다. 레이저 발진을 위한 공진기는 두 개의 공진 파장(공진기1과 공진기2 안의 λ_1, λ_2)을 가지는 광섬유 격자와 광섬유 루프 미러를 이용하여 구성하였다. 이득 매질로는 3.3 m 어븀 첨가 광섬유(OFS Inc., MP980)를 사용하였다. 어븀 첨가 광섬유는 1530 nm 파장에서 첨부 흡수율(Peak absorption)이 6.0 dB/m 로 측정되었다. 그리고, $\sim 200 \text{ mW}$ 의 980 nm 레이저 다이오드를 이용하여 레이저 발진을 유도하였다. 두 개의 광섬유 격자1과 2는 각각 공진 파장 1550.25 nm (λ_1) 와 1534.23 nm (λ_2)에서 90% 과 99.6% 의 반사율을 가진다. 공진기1과 공진기2를 구성하기 위해서 반사율을 다른 두 개의 광섬유 격자들을 직렬형태로 연결하였고 각각 광섬유 루프 미러를 이용하여 이득 매질을 공유하는 두 개의 레이저 공진기를 구성하였다. 광섬유 격자의 반사도가 다르며 공진기를 구성하면서 손실을 측정한 결과 공진기1과 공진기2의 손실은 각각 25 와 10 dB로 측정되었다. 라디오 주파수(radio frequency, RF) 신호를 이용한 음향 광학적

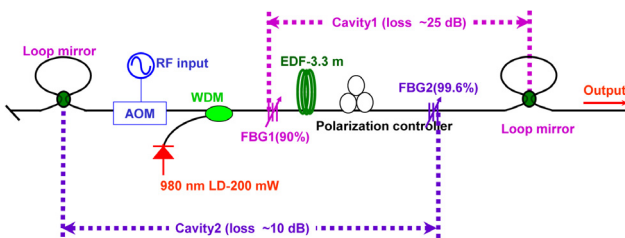


FIG. 1. (a) Experimental scheme for the proposed dual wavelength EDF laser with lasing wavelength tunability and switchability.

변조기(acousto-optic modulator, AOM)를 사용하여 공진기를 켜짐/꺼짐 시켜서 파장을 스위칭할 수 있도록 구성하였다. RF 신호는 $\sim 60 \text{ nsec}$ 이하의 빠른 광학적 상승 시간(optical rise time)으로 인하여 빠른 발진 파장 스위칭을 가능하게 해준다. 파장 가변을 위하여 두 개의 광섬유 격자를 금속판에 고정시키고 U-자형 구부림 기술을 사용하여 인장력 및 수축력을 인가하여 광섬유 격자의 공진 파장을 각각 장파장 및 단파장으로 가변하여 광섬유 레이저의 발진 파장을 자유롭게 조절하였다¹¹⁾. 선형 이동 스테이지와 스테이지 위에 고정된 두 개의 선회축(pivot)을 이용하여 U-자형 구부림을 인가하였다. 즉 광섬유 격자는 광섬유 고정대에 고정되어 있고 광섬유 격자 중앙에 배열되어 있는 선형 이동 스테이지를 움직이면 스테이지 위에 고정된 두 개의 선회축이 광섬유 격자를 밀면서 광섬유 격자에는 U-자형 구부림이 인가된다¹¹⁾. 구부림이 인가되어 공진 파장이 변하더라도 광섬유 격자의 반사율을 변하지 않았다.

그림2와 3은 음향 광학적 변조기의 켜짐/꺼짐 상태에 따른 스위칭이 가능한 쌍파장 가변 광섬유 레이저의 출력 스펙트럼을 보여준다. 음향 광학적 변조기가 꺼진 상태일 때, 광신호가 광섬유 루프 미러를 통과하지 못하므로 광섬유 격자2와 함께 공진기2를 구성하지 못한다. 즉 공진기2가 동작하기

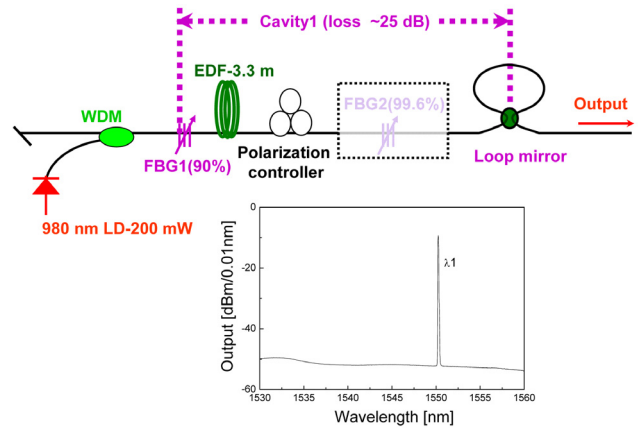


FIG. 2. Experiment configuration and output spectrum when the AOM is in the off-state.

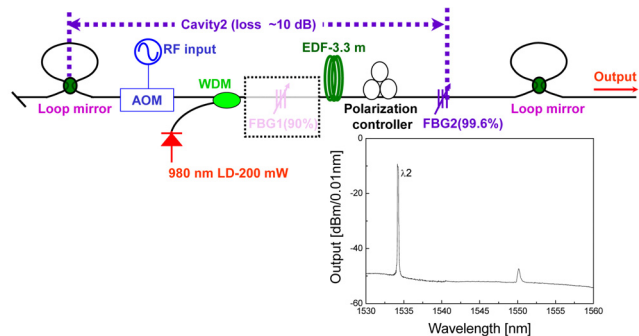


FIG. 3. Experiment configuration and output spectrum when the AOM is in the on-state.

위해서는 광신호가 광섬유 루프를 통해서 반사되어 광섬유 격자2에서 다시 반사가 이뤄지면서 이득 매질인 어븀 첨가 광섬유를 통해서 레이저 발진이 일어나야 하는데 음향광학적 변조기가 꺼진 상태에서는 이러한 과정을 얻을 수 없다. 따라서 공진기2의 영향을 받지 않기 때문에 공진기1에서 발진 파장 λ_1 이 생긴다. 그림 2에서는 음향 광학적 변조기가 꺼진 상태에서 공진기2의 효과가 억제되는 효과를 나타내기 위해 광섬유 격자2를 접선으로 흐리게 표현하였고 공진기1이 활성화됨을 보이고 있으며 발진 파장 λ_1 에서 레이저 출력을 나타내고 있다. 음향 광학적 변조기가 켜져 있을 때(on)는 공진기1의 손실(~25 dB)이 공진기2의 손실(~10 dB)보다 크기 때문에 발진파장 λ_1 에서 λ_2 로 변환된다. 이것은 어븀 첨가 광섬유의 homogenous line broadening 효과에 의한 것이다. 어븀 첨가 광섬유 기반 광섬유 레이저는 공진기에서 가장 손실이 작은 파장에서 레이저 발진이 일어나며 레이저 발진이 일어나면 이득이 발진 파장에 집중되는 효과를 가지고 있다. 이러한 현상을 homogenous line broadening이라고 한다. 따라서 공진기 손실이 작은 공진기2에서 발진이 일어나므로 발진파장의 변환이 유도될 수 있다. 그림 3에서는 변조기가 켜진 상태에서 공진기1의 효과가 억제되는 효과를 나타내기 위해 광섬유 격자1를 접선으로 흐리게 표현하였고 공진기2가 활성화됨을 보이고 있으며 파장 λ_2 에서 레이저 출력을 나타내고 있다. 따라서 공진기2의 발진 파장인 λ_2 에서 레이저 출력을 얻을 수 있다. 제안된 광섬유 레이저의 안정도를 검증하기 위해서 60분동안 출력 변화를 측정하였다. 그 결과 출력의 변화가 크게 나타나지 않았으며 출력 변화는 0.6 dB 이하로 측정되었다. 파장 스위칭을 하더라도 ~40 dB 이상의 높은 소광비를 갖는 고성능의 광섬유 레이저 출력을 구현할 수 있었다.

광섬유 격자에 스트레인이 가해지면 광섬유 격자 격자 주기가 변하기 때문에 공진 파장이 변한다. 광섬유 격자에 구부림을 인가하더라도 동일하게 공진 파장의 변화를 유도할 수 있다. 즉 구부림을 인가하는 방향에 따라 인장력 및 수축력이 광섬유 격자에 유도되고 광섬유 격자의 공진 파장이 각각 장파장 및 단파장으로 이동한다. 구부림에 따른 발진 파장 이동($\Delta\lambda$)는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\Delta\lambda = (1 - \rho)\epsilon\lambda_p$$

λ_p 는 광섬유 레이저의 발진 파장이고, ρ 는 광탄성 계수, 그리고 ϵ 는 광섬유를 구부림으로써 가해지는 변형력이다. 구부림 방향에 따라 인장력 및 수축력이 유도될 수 있다^[11].

그림 4(a)에서는 광섬유 격자에 인가되는 구부림 변화에 따른 광섬유 레이저의 출력 스펙트럼을 나타내고 있다. 음향 광학적 변조기가 꺼진 상태(off) 일 때, 공진기2는 차단되고 공진기1의 발진파장 λ_1 을 얻어낼 수 있었다. 광섬유 격자를 (-)방향으로 구부림으로써 광섬유 격자1에 수축력을 유도하여 발진파장 λ_1 을 단파장으로 이동시켰다. 구부림이 증가할

수록 광섬유 격자1에 인가되는 수축력이 증가하므로 발진 파장은 단파장으로 더욱 이동하게 된다. 그림 5(a)는 광섬유 격자2에 (+)방향으로 구부림을 가했을 때 발생하는 인장력에 의해 공진 파장이 장파장으로 이동하는 효과를 나타내고 있다. 음향 광학적 변조기가 켜진 상태 (on) 상태에서 공진기2에 의해서 λ_2 가 발진하게 되며 공진기2를 구성하는 광섬유 격자 2에 인장력에 의해서 광섬유 레이저의 발진 파장이 장파장으로 이동함을 알 수 있다. 그림 4(b)와 5(b)는 광섬유 격자1과 격자2에 인가되는 구부림에 따른 발진 파장의 변화를 곡률변화의 함수로 나타내고 있다. 구부림 방향에 따른 수축력과 인장력에 따라 각각 발진 파장은 단파장 및 장파장을 가변되었고 0.5 에서 1.6 m^{-1} 의 곡률 범위 안에서 발진 파장의 가변성은 ~7.2 nm/m^{-1} 로 측정되었다.

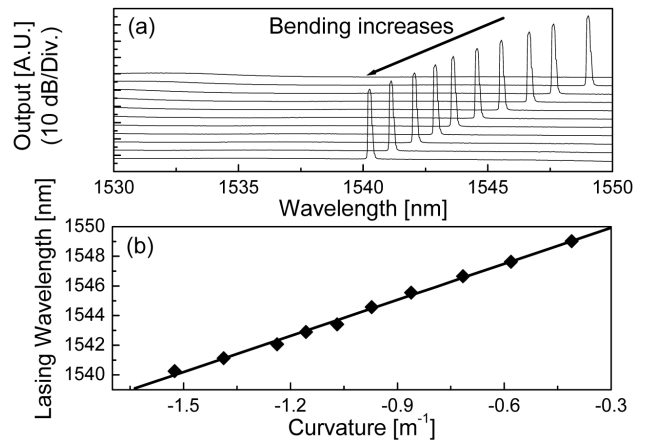


FIG. 4. (a) Output spectra of the proposed EDF laser with a negative bending change in FBG1 and (b) the lasing wavelength shift as a function of the negative bending curvature change.

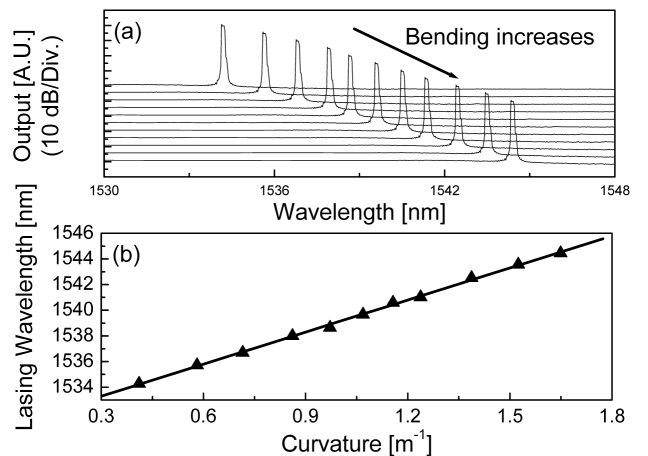


FIG. 5. (a) Output spectra of the proposed EDF laser with a positive bending change in FBG2 and (b) the lasing wavelength shift as a function of the positive bending curvature change.

III. 결 론

본 논문에서는 파장 가변 및 스위칭이 가능한 어븀 첨가 광섬유 레이저를 구현하였다. 음향광학 변조기로 두 레이저 발진 파장들 사이에 선택적으로 스위칭하는 기능을 가지면서 동시에 광섬유 격자에 인장력 및 수축력을 인가하여 발진 파장을 가변할 수 있는 기능성 쌍파장 광섬유 레이저를 구현하였다. 두 개의 광섬유 격자와 두 개의 광섬유 루프 미러를 사용하여 레이저 발진을 위한 두 개의 선형 공진기를 구성하였다. 두 개의 광섬유 격자들의 반사도는 각각 90%, 99.6%로 측정되었으며 다른 반사도를 가지고 있기 때문에 선형 공진기에서 다른 공진기 손실을 유도할 수 있었다. 어븀 첨가 광섬유를 이득 매질로 사용하였고 두 개의 선형 공진기 내부에 이득 매질을 삽입하여 파장 스위칭 효과를 구현하였다. 즉 두 개의 선형 공진기들의 손실을 차별화하고 어븀 첨가 광섬유의 균일한 넓은 선폭 효과와 음향광학적 변조기의 커짐/꺼짐 상태에 의해 발진 파장을 선택적으로 스위칭하였다. 실온에서 두 개의 선형 공진기 손실을 조절하여 한 개 또는 두 개의 발진 파장을 얻을 수 있다. 공진기를 구성하는 광섬유 격자에 구부림 기반의 인장력 및 수축력을 유도하여 발진 파장을 자유롭게 조절하였다. 파장 스위칭을 하는 모든 경우에 대해 40 dB 이상의 높은 소광비를 가지는 고성능의 광섬유 레이저를 구현하였다. 한 개 또는 두 개의 파장 발진에서 광섬유 레이저의 출력은 안정적이었다. 발진 파장의 가변성 변화는 7.2 nm/m^{-1} 로 측정되었다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부와 한국연구재단의 원자력연구개발사업으로 연구 지원한 (2010-0025914호)의 결과물입니다.

References

1. Q. Mao, W. Y. L. John, "Switchable multiwavelength erbium-doped fiber laser with cascaded fiber grating cavities," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**, 612-614 (2002).

2. L. Talaverano, S. Abad, S. Jarabo, and M. López-Amo, "Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19**, 533-535 (2001).
3. Y. G. Han, T. V. A. Tran, and S. B. Lee, "Wavelength-spacing tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing of dispersion shifted fiber," *Opt. Lett.* **31**, 703-705 (2006).
4. Y. Z. Xu, H. Y. Tam, W. C. Du, and M. S. Demokan, "Tunable dual wavelength switching fiber grating laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10**, 334-336 (1998).
5. C. L. Zhao, X. Yang, C. Lu, N. J. Hong, G. Xin, P. R. Chaudhuri, and X. Dong, "Switchable multiwavelength erbium-doped fiber lasers by using cascaded fiber Bragg gratings written in high birefringence fiber," *Opt. Comm.* **230**, 313-317 (2004).
6. S. Hu, Y. J. Song, W. Li, S. Y. Luo, and X. Y. Xia, "Switchable multiwavelength erbium-doped fiber ring laser with a multisection high-birefringence fiber loop mirror," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 1387-1389 (2005).
7. H. L. An, X. Z. Lin, E. Y. B. Pun, and H. D. Liu, "Multiwavelength operation of an erbium-doped fiber ring laser using a dual pass Mach-Zehnder comb filter," *Opt. Comm.* **169**, 159-165 (1999).
8. Y. G. Han and S. B. Lee, "Tunable dispersion compensator based on uniform fiber Bragg grating and its application to tunable pulse repetition-rate multiplication," *Opt. Express* **13**, 9224-9229 (2005).
9. J. H. Bahk, S. M. Choi, Y. G. Han, S. H. Kim, and S. B. Lee, "Apodization of linearly chirped fiber gratings for dispersion compensation," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **15**, 214-221 (2004).
10. J. Kim, J. Bae, Y. G. Han, S. H. Kim, and S. B. Lee, "Tunable dispersion compensator based on chirped fiber Bragg gratings with a mechanical rotator," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **15**, 100-103 (2004).
11. Y. G. Han, X. Dong, J. H. Lee, and S. B. Lee, "Simultaneous measurement of bending and temperature based on a single sampled chirped fiber Bragg grating embedded on a flexible cantilever beam," *Opt. Lett.* **31**, 2839-2841 (2006).