

## 파장 가변 단일 주파수 어븀 첨가 광섬유 선형 공진기 레이저

## Widely Tunable Single-Frequency Er-doped Fiber Linear-Cavity Laser

장순혁, 용재철, 김병운  
 한국과학기술원 물리학과  
 nayana@cais.kaist.ac.kr

1.55  $\mu\text{m}$ 의 파장 영역에서 동작하는 파장 가변 단일 주파수 레이저는 파장 분할 방식(WDM) 광통신 시스템, 분광학 또는 광센서 등에서의 응용 가능성을 가지고 있다. 특히, 파장 가변 단일 주파수 광섬유 레이저는 선폭이 좁고, 세기 잡음이 작으며, 출력 파워가 큰 한편, 광섬유로의 집적이 간단하다는 등의 장점을 가지고 있어 이에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 주파수 변환기와 광섬유 흡수 격자를 이용하여 긴 길이의 선형 공진기에서 구현된 파장 가변 단일 주파수 어븀 첨가 광섬유 레이저의 동작에 관하여 기술하였다.

그림. 1은 본 레이저의 실험 장치도이다. 이득 매질인 어븀 첨가 광섬유는 주파수 감소 변환기와 주파수 증가 변환기의 사이에 위치하고, 포화 흡수체로 사용된 펄핑되지 않은 어븀 첨가 광섬유는 레이저 공진기 한 쪽 끝에 놓이도록 하였다. 주파수 증가 변환기와 주파수 감소 변환기의 동작에 의하여, 주파수 변환기 사이에서 서로 반대 방향으로 진행하는 빛은 서로 다른 주파수를 가지게 되어, 이득 매질에서 정상파가 생기지 않는다<sup>(1)</sup>. 이러한 상황에서는 spatial hole burning 효과가 발생하지 않으므로, 한 개의 종모드의 발진으로 충분히 모든 이득을 사용하게 되어 단일 주파수의 레이저 발진이 가능하게 된다. 한편, 포화 흡수체에서는 정상파가 생기게 되어 흡수 격자를 형성하며, 이 흡수 격자는 모드 호핑을 억제하여 안정한 단일 종모드 발진을 가능하게 하는 좁은 선폭의 대역 투과 필터로 동작한다<sup>(2,3)</sup>. 이 때 사용된 주파수 변환기들은 또한 파장 가변 광필터로 동작할 수 있어서 레이저의 파장 가변이 이루어지도록 하였다.

실험에서 이득 매질로 3 m의 어븀 첨가 광섬유(어븀 농도  $\sim 900$  wt ppm), 포화 흡수체로 5 m의 어븀 첨가 광섬유(어븀 농도  $\sim 80$  wt ppm)가 사용되었다. 펄프광은 980 nm의 레이저 다이오드로부터 WDM(980/1550nm) 광섬유 결합기를 통하여 이득 매질로 입사하도록 하였다. 레이저 공진기의 나머지 부분은 통신용 단일 모드 광섬유로 구성하였으며, 공진기의 전체 길이는 21 m이었다. 주파수 변환기로는 이중 모드 광섬유 음향 광학 주파수 변환기를 사용하였다<sup>(4)</sup>. 주파수 변환기의 파장 가변 광필터로서의 투과 파장 선폭은 6.5 nm의 값을 가졌다. 그 중심 파장은 주파수 변환기에 걸어주는 RF 주파수,  $f_a$ 에 비례하여 변화하였으며, 그 기울기는 0.37 nm/kHz로 측정되었다.

주사형 파브리-페로 간섭계(선폭  $\sim 1$  MHz)를 이용하여 안정한 단일 종모드의 레이저 출력을 관찰할 수 있었다. 펄프광의 세기를 문턱값인 35 mW에서부터 사용된 펄핑용 레이저 다이오드의 최대값인 90 mW까지 변화하여도 레이저의 출력은 단일 종모드로 동작하는 것을 확인하였다. 실험실 환경에서 레이저 종모드는 1시간 이상 모드 호핑 없이 안정하게 유지되었다. 레이저 선폭을 측정하기 위하여 다른 광섬유 레이저와 간섭시켜 그 맥놀이 신호의 선폭을 측정하였으며, 이로부터 레이저 선폭은 2.3 kHz 이하임을 알 수 있었다. 인접 모드 억제율(side mode suppression ratio)을 DC 출력과 첫 번째 종모드 맥놀이 신호의 크기로부터 계산하였으며, 이 값은 50 dB 이상이었다.

그림. 2는 주파수 변환기에 걸어주는 RF 주파수,  $f_A$ 를 2.98 MHz에서 3.09 MHz까지 10 kHz 간격으로 변화시키면서 레이저 출력의 파장 스펙트럼을 측정한 것이며, 그림. 3은 이 때의 레이저 출력 파장을  $f_A$ 에 대하여 그래프로 나타낸 것이다. 레이저는 단일 주파수의 동작이 유지되면서, 어븀 첨가 광섬유 이득 영역에서 파장을 40 nm 이상 가변 할 수 있었다.

이 논문에서는 주파수 변환기와 광섬유 흡수 격자를 이용하는, 긴 길이의 선형 공진기에서 구현된 파장 가변 단일 주파수 어븀 첨가 광섬유 레이저를 설명하였다. 인접 모드 억제율이 50 dB 이상, 파장 가변 영역이 40 nm 이상인 안정한 단일 주파수 레이저를 구현하였다.

[1] R. Stolte and R. Ulrich, "Er-fiber lasers: suppression of spatial hole burning by internal modulation", Electron. Lett., **29**, 1686-1688 (1993)  
 [2] H. S. Kim, S. K. Kim, and B. Y. Kim, "Longitudinal mode control in few-mode erbium-doped fiber laser", Opt. Lett., **21**, 1144-1146 (1996)  
 [3] Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh, R. I. Laming, and D. N. Payne, "Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter", Opt. Lett., **20**, 875-877 (1995)  
 [4] S. H. Yun, I. K. Hwang, and B. Y. Kim, "All-fiber tunable filter and laser based on two-mode fiber", Opt. Lett., **21**, 27-29 (1996)

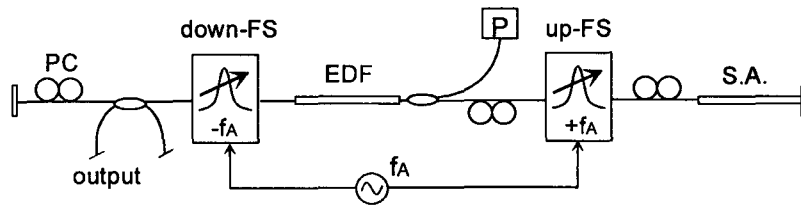


그림. 1 : 파장 가변 단일 주파수 어븀 첨가 광섬유 레이저. FS: 주파수 변환기, EDF: 어븀 첨가 광섬유, S.A.: 포화 흡수체 (펄핑하지 않은 EDF), P: 펄핑용 레이저 다이오드, PC: 편광 조절기,  $f_A$ : RF 주파수.

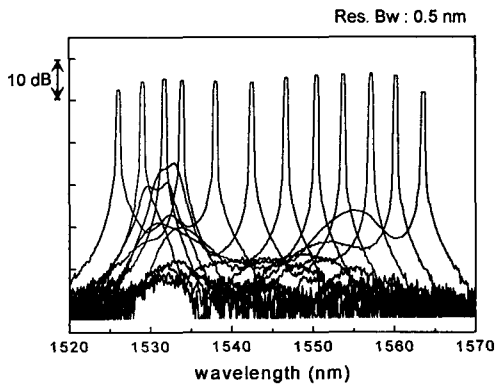


그림. 2 : 레이저 파장 스펙트럼. 각각의 스펙트럼은  $f_A$ 의 값을 2.98 MHz에서 3.09 MHz까지 10 kHz 간격으로 변화하면서 측정하였다.

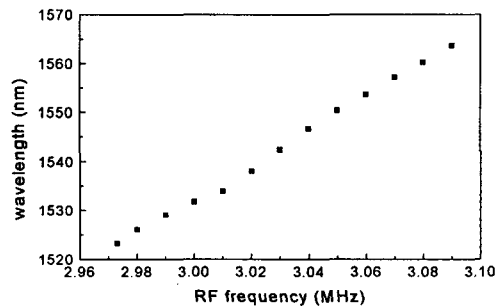


그림. 3 : RF 주파수  $f_A$ 의 값에 따른 레이저의 출력 파장