

반도체 포화 흡수체 거울에 입사되는 광의 크기에 따른 모드 잠금된 Yb 첨가된 광섬유 레이저 출력 특성

문동준^{1,2} · 김명진¹ · 안철용¹ · 김남성² · 김현수^{1†}

¹조선대학교 광기술공학과
☎ 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

²이오테크닉스(주)
☎ 431-062 경기도 안양시 동구 관양 2동 864-4번지

(2012년 3월 26일 받음, 2012년 5월 24일 수정본 받음, 2012년 5월 31일 게재 확정)

본 논문에서는 반도체 포화 흡수체 거울 (SESAM)에 입사되는 단위 면적당 광세기 변화에 따른 이터븀 첨가 광섬유 레이저의 모드 잠금 출력 특성을 고찰하였다. 단위 면적당 광세기를 변화시키기 위해 공진기 내부에 설치된 렌즈의 초점거리를 조절하여 SESAM에 입사되는 광의 크기를 변화시켰다.

Dependence of Mode Locked Yb-doped Fiber Laser Output on the Size of the Beam Incident upon a Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Dong Joon Moon^{1,2}, Myung Jin Kim¹, Cheol Yong Ahan¹, Nam Seong Kim², and Hyun Su Kim^{1†}

¹Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

²EO Techniques Co., Anyang 431-062, Korea

(Received March 26, 2012; Revised manuscript May 24, 2012; Accepted May 31, 2012)

We investigate the dependence of the output of a mode locked Yb-doped fiber laser on incident intra-cavity intensity on a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). To vary the incident intra-cavity intensity, we change the beam spot size on a SESAM by varying the focal length of a lens installed in the front of the SESAM.

Keywords: Fiber laser, Saturable absorber, Mode locking, Ultrafast laser

OCIS codes: (140.3510) Fiber lasers; (140.3615) Ytterbium lasers; (140.7090) Ultrafast lasers; (140.4050) Mode-locked lasers

I. 서 론

이터븀 첨가 광섬유 레이저는 산업용으로 활용 가능성이 높은 연속 발진 고출력 레이저로 많이 개발되고 있으며 또한 극초단 펄스 레이저로도 많은 연구가 이루어지고 있다^{1, 2}. 이터븀 첨가 광섬유는 다른 희토류 이온이 첨가된 광섬유보다 넓은 방출 스펙트럼 폭을 가지고 있기 때문에 극초단 펄스 발생용 레이저 제작에 적합하다². 이터븀 첨가 광섬유를 이용해서 극초단 레이저를 발생하기 위해 능동형 또는 수동형 모드잠금 기술을 사용한다³⁻⁶. 일반적으로 수동형 모드잠금에 의한 레이저 펄스 폭이 능동형 모드 잠금에 의한 레

이저 펄스 폭보다 더 작아 수동형 모드 잠금에 의한 광섬유 레이저는 첨두 광 세기가 높은 레이저 출력을 갖는다. 또한 제조 비용이 능동형보다 수동형이 현격히 낮기 때문에 기술적, 경제적 가치가 높은 수동형으로 모드 잠금된 이터븀 첨가 광섬유 레이저 연구가 많이 이루어지고 있다. 광섬유 레이저에서 수동형 모드 잠금 기술로 주로 활용되는 것은 Kerr 효과를 이용한 비선형 편광회전에 의한 모드 잠금과 반도체 포화 흡수체를 이용한 모드 잠금이다⁴⁻⁶. 반도체 포화 흡수체를 이용한 모드 잠금 기술에 의한 레이저 구성은 비선형 편광회전에 의한 구성보다 매우 간단하다. 이러한 포화 흡수체에 의한 모드 잠금 기술의 장점 때문에 SESAM (SEmicon-

†E-mail: hskim21@chosun.ac.kr

ductor Saturable Absorber Mirror)을 이용한 모드 잠금 연구가 많은 연구자에 의해 수행되었다^{5, 6}. SESAM을 이용하여 안정적인 모드잠금을 구현하기 위해서는 공진기 길이, 레이저 이득 및 손실, 공진기 내부 광 세기, SESAM의 비선형 반사율의 단위 면적당 광 세기에 대한 기울기 등을 고려하여 레이저를 설계해야 한다⁷. SESAM의 비선형 반사율의 단위 면적당 광 세기에 대한 기울기 값은 SESAM에 레이저 광을 집속하는 집속 렌즈의 초점거리에 따라 그 값이 변화하게 되어 극초단 레이저 발진 조건에 많은 영향을 줄 수 있다. 따라서 초점거리 또는 SESAM에 입사하는 입사광의 세기에 따른 극초단 레이저의 출력 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 SESAM을 이용한 이터븀 첨가 광섬유 레이저를 제작하고 공진기 내부에 초점거리가 다른 렌즈를 사용하여 SESAM에 입사되는 단위 면적당 광 세기를 변화시키면서 제작된 광섬유 레이저의 모드 잠금 출력 특성을 조사하였다.

II. 광섬유 레이저 구성

그림 1은 본 실험을 위해 설계된 레이저 공진기의 구성도이다. 이득 매질을 여기 시키기 위한 펌프 광원은 중심 파장이 976 nm이고 최대 출력이 720 mW인 14 핀 나비형 형태의 레이저 다이오드(LD)를 여기 광으로 사용하였다. 여기 광을 입사시키기 위한 소자로는 5 W의 평균파워, 10 kW의 피크파워를 허용하는 편광 유지형 파장분할 다중화 결합기(PM WDM)가 사용되었다. PM WDM은 980 nm의 펌프파장과 중심 발진파장 1030 nm를 필터에 의해 투과와 반사시킴으로써 서로 다른 파장의 경로를 조정할 수 있다. 이득 매질로는 모드필드 지름이 7.51 μm 인 이터븀 첨가 광섬유이며 975 nm에서 250 dB/m의 코어 흡수율을 가지며 본 실험에서는 132 mm의 길이가 사용되었다. 수동형 광섬유는 모드필드 지름은 6.61 μm 이며 PANDA형이다. 편광 유지형 출력 결합기는 30%의 출력 비를 갖는다. 반사 거울은 약 980 nm에서 1100 nm까지의 파장에 대해 99% 이상의 반사율을 갖는다. 수동형 모드 잠금을 위한 소자로는 다중 우물 구조로 설계된 BATOP사 제품의 SESAM을 사용하였다. SESAM은 25 mm의 구리 열 발산 판의 중심에 위치하며 4x4 mm의 크기를 가지며 흡수 중심파장은 1040 nm이며, 40%의 흡수율, 30%의 변조크기, 그리고 9 ps의 이완 시간을 갖는다. 마지막으로 거울과 SESAM으로 입사시키기 위한 광섬유의 끝 단면은 FC-APC 타입의 커넥터를 사용하였다. 경사형 접촉 방식(APC: Angled Physical Contact)은 비경사형 접촉 방식(PC: Physical Contact)과 비교하면 광섬유 축의 법선에 대해 8° 정도 기울어져 있기 때문에 경계면에서 반사된 광 신호가 광섬유의 클래딩이나 외부로 나가도록 함으로써 반사에 의한 영향을 줄일 수 있는 커넥터이다.

SESAM에 입사되는 빔의 반경을 변화시키기 위해 그림 1의 L_1 렌즈의 초점거리(f_1)는 8 mm로 고정하였으며, L_2 렌즈의 초점거리(f_2)는 6.2 mm, 8 mm, 11 mm, 15 mm의 초점거

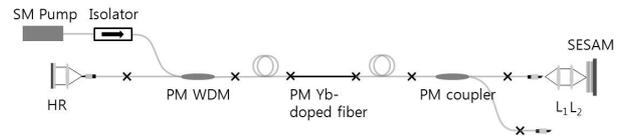


FIG. 1. Experiment setup for a mode locked Yb-doped fiber laser. HR: High reflection mirror; L_1 , L_2 : Lenses.

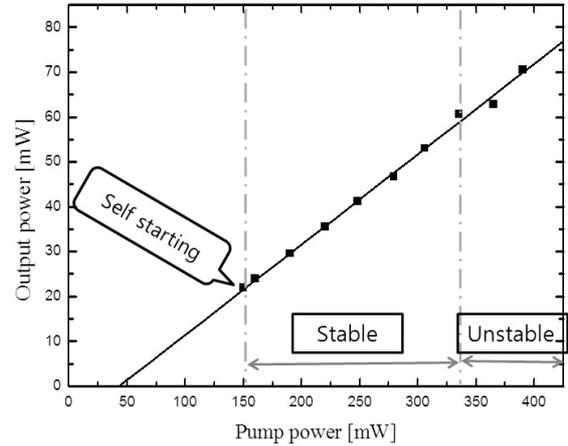


FIG. 2. Laser output powers at $f_2=15$ mm.

리를 갖는 4종류의 비구면 렌즈를 이용하여 모드잠금 출력 특성을 조사하였다.

III. 실험 결과 및 논의

그림 2는 L_1 과 L_2 를 각각 초점거리 8 mm와 15 mm인 비구면 렌즈를 사용했을 때 레이저 출력을 나타낸다.

펌프 광 세기 약 150 mW에서 22 mW의 출력과 함께 자기 발진(self-starting) 모드 잠금을 관측할 수 있었고, 펌프 레이저의 출력을 선형적으로 올리면서 최대 390 mW 펌프 광 세기에서 70.5 mW의 출력을 얻을 수 있었다. 그러나 펌프 광 세기 335 mW 이상에서 발진된 모드 잠금은 오랜 시간 지속되지 못하거나 2개의 펄스 발진 현상이 발생하는 다소 불안정한 모드 잠금이 관측되었다. 모드 잠금된 레이저의 출력은 20%의 기울기 효율을 보였으며, 이때 반복률은 9.47 MHz였다. 이때 레이저 출력 펄스 열은 그림 3과 같다.

그림 4는 안정적인 모드 잠금을 보여주었던 펌프 광 세기 160 mW에서 336 mW까지 스펙트럼 결과 값을 나타낸다. 여기서, 안정적인 레이저가 Q 스위칭 효과 없이 공진기 왕복 시간과 동일한 주기의 펄스 열로 발진할 때를 말한다. 150 mW의 펌프 광을 입력하면 스펙트럼의 반치폭이 6.7 nm였으며, 선형적으로 펌프 광을 증가시키면 스펙트럼 반치폭이 증가함을 확인하였다. 150 mW에서 336 mW까지의 펌프 광에 대한 스펙트럼 반치폭은 연속적으로 증가하였지만, 336 mW를 초과하는 펌프 광이 입력되었을 때는 다소 줄어드는 것을 확인하였다. 그리고 펌프광의 세기가 306 mW에 대한 결과는 그림 4에 나타내지 않았지만 306 mW부터 스펙트럼의 날

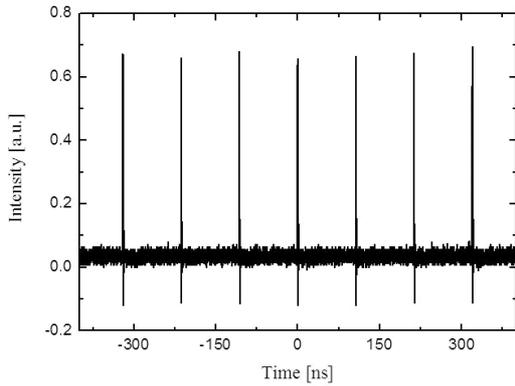


FIG. 3. Mode locked output pulse train from the mode locked Yb-doped fiber laser.

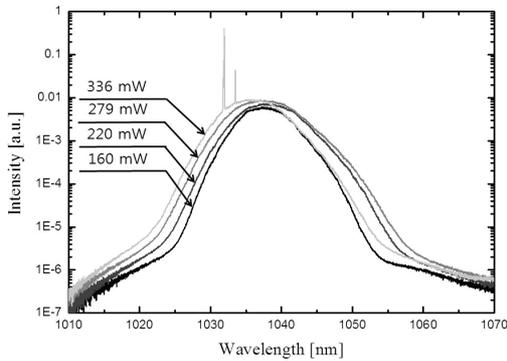


FIG. 4. Laser output spectrums at $f_2=15$ mm.

개 부분에서 피크가 발생하였다. 비록 스펙트럼 상에 피크가 나타났지만 이 영역에서는 Q 스위칭 효과나 다중 펄스 효과는 나타나지 않았다. 펌프광의 세기에 따른 스펙트럼 반치폭의 변화와 스펙트럼은 그림 5을 통해 확인할 수 있다. 이 실험 데이터에서 확인된 최대의 스펙트럼 반치폭은 9.7 nm이고, 단순 가우시안 펄스라고 가정하면 계산된 변환한계 펄스 폭은 약 160 fs에 해당된다.

SESAM에 입사되는 빔의 사이즈를 줄이기 위해 15 mm의 초점거리 보다 더 짧은 11 mm의 초점거리를 갖는 렌즈를 이용하여 모드 잠금 출력 특성을 알아보았다. 초점거리 11 mm의 렌즈를 이용한 모드 잠금의 자기발진은 125 mW에서 시작하였으며 이때의 출력은 18.3 mW였다. 초점 거리 (f_2)가 15 mm 일 때 보다 자기발진 문턱파워가 낮아짐을 알 수 있다. 출력 값의 기울기 효율은 22.9%이다. 펌프 광 세기를 선형적으로 증가시키면서 그에 따른 모드 잠금 특성을 확인하였으며, 그 결과는 그림 6에서 확인할 수 있다. 11 mm의 초점거리를 갖는 렌즈를 이용한 모드 잠금 실험에서는 15 mm의 초점거리를 갖는 렌즈 결과에서 보다 낮은 펌프 광 세기 약 310 mW 근처에서 단일 펄스가 아닌 2개 펄스 모드 잠금이 관측되었다.

그림 7과 그림 8은 스펙트럼 데이터에서 얻은 결과로서 펌프 광 세기 125 mW에서 4.9 nm의 스펙트럼 반치폭을 얻었

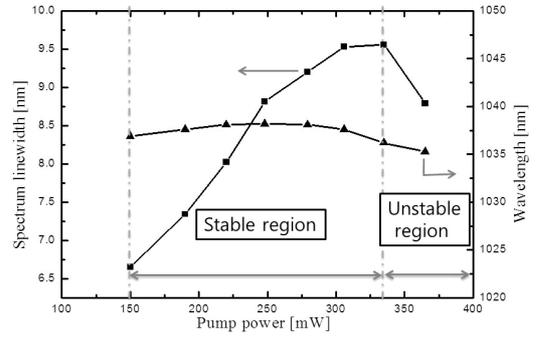


FIG. 5. Laser output spectrums widths and center wavelengths at $f_2=15$ mm.

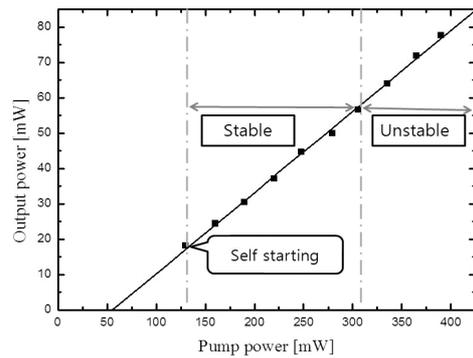


FIG. 6. Laser output powers at $f_2=11$ mm.

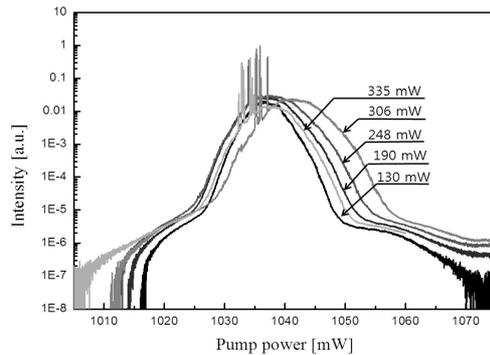


FIG. 7. Laser output spectrums at $f_2=11$ mm.

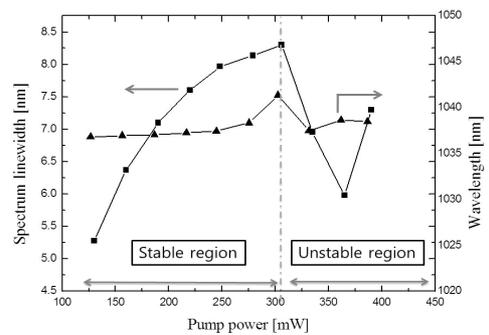


FIG. 8. Laser output spectrums widths and center wavelengths at $f_2=11$ mm.

고 펌프 광 세기 증가에 따라 스펙트럼 반치폭이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 펌프 광 세기 248 mW에서 7.8 nm의 선폭을 가졌다. 펌프 광 세기의 증가는 스펙트럼의 반치폭을 증가시켰으며, 불안정영역인 306 mW부터 365 mW의 펌프 광 세기의 구간에서는 오히려 반치폭이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

초점거리 11 mm의 렌즈를 이용한 모드 잠금에서 얻어진 최대의 스펙트럼 반치폭은 8.3 nm로서 9.8 nm였던 15 mm 렌즈를 이용한 모드 잠금보다 낮은 값이었으며, 가우시안형 펄스로 가정했을 때의 계산된 변환한계 펄스폭은 대략 190 fs로 15 mm 렌즈의 경우 보다 펄스폭이 커짐을 알 수 있었다.

다음은 초점거리 8 mm인 비구면 렌즈를 이용한 모드 잠금 발진 실험에 대한 결과이다. 이때의 출력 특성은 그림 9를 통해 확인할 수 있다. 처음 자기발진 수동 모드 잠금 특성은 펌프 광 세기 115 mW에서 15 mW의 출력과 함께 관측되었고 펌프 광 세기를 선형적으로 증가하면서 약 220 mW의 펌프 광 세기에서 37 mW의 출력을 보이며 안정적인 모드 잠금 파형을 관측할 수 있었다. 하지만 250 mW에서 부터는 모드 잠금이 형성되기는 하지만 오랜 시간 지속되지 못하는 불안정한 모드 잠금의 발진특성을 보였다.

그림 10과 그림 11은 입력 펌프 파워에 대한 스펙트럼 선 폭과 출력 파장을 나타내고 있다. 첫 수동 모드 잠금이 형성된 펌프 광 세기 115 mW에서는 중심파장이 1039 nm였으나, 펌프 광 세기를 증가하면서 중심파장이 1029 nm로 이동하는 것을 관측할 수 있었으며 이때 3.4 nm의 반치폭을 가졌다. 펌프 광 세기의 증가에 따른 스펙트럼 반치폭의 증가를 관측하였다.

마지막으로 6.2 mm의 초점거리를 갖는 실험에서는 수동 모드 잠금된 출력을 얻을 수 없었다. 100 mW 이하의 적은 펌프 광의 세기에서 레이저가 발진하는 순간 광섬유의 단면과 SESAM의 표면에 손상이 발생하여 실험을 수행할 수 없었다.

지금까지 4종류의 초점거리를 갖는 비구면 렌즈를 이용하여 SESAM에 입사하는 빔의 크기를 변화시키면서 모드 잠금 특성을 관찰해 보았다. 그림 12와 같이 실험 결과는 렌즈 초점거리 (f_2)의 값이 증가할수록 자기발진에 의한 모드 잠금

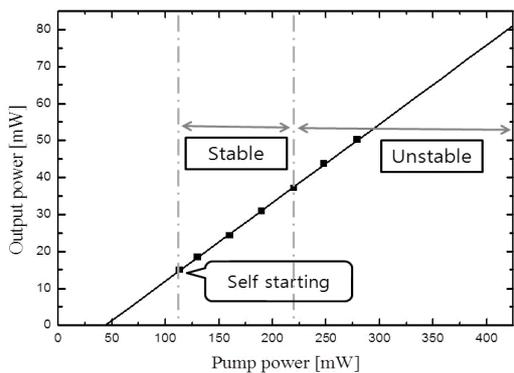


FIG. 9. Laser output powers at $f_2=8$ mm.

이 일어나기 위한 최소 레이저 출력(P_{s-s})이 증가함을 보여주었다.

자기 발진에 의한 모드 잠금된 펄스의 광세기와 렌즈 초점 거리 (f_2)와의 관계는 고체레이저의 경우에 대한 다음의 모드 잠금 펄스 발진 조건 식을 이용해 정성적 분석을 할 수 있다 [7].

$$P_{(s-s)} \propto \sqrt{F_{sat,a} \omega_a^2 F_{sat,g} \omega_g^2 \Delta R} \quad (1)$$

여기서 $F_{sat,a}$ 와 $F_{sat,g}$ 는 각각 SESAM과 광섬유 이득매질의 단

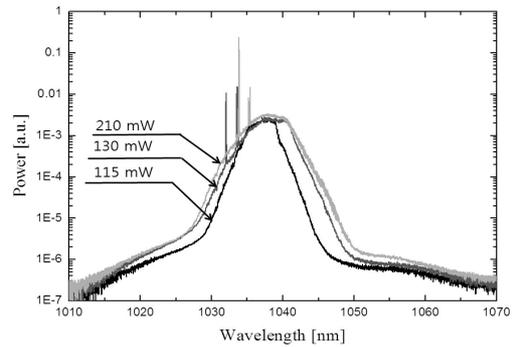


FIG. 10. Laser output spectra at $f_2=8$ mm.

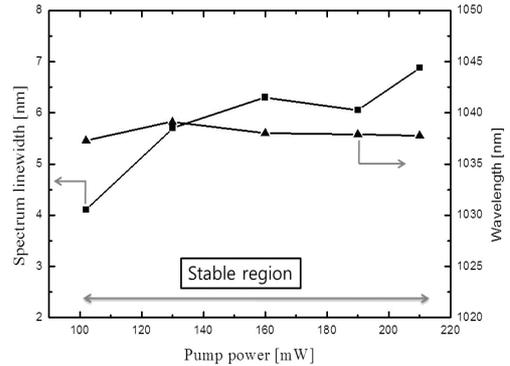


FIG. 11. Laser output spectrum widths and center wavelengths at $f_2=8$ mm.

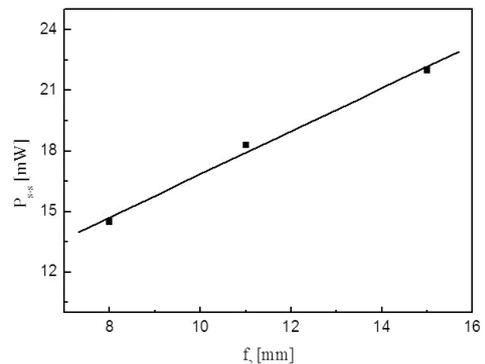


FIG. 12. The minimum laser output powers when a mode locked pulse is self-started.

위면적 당 포화 에너지이고 ω_a 와 ω_g 는 각각 SESAM과 광섬유 이득매질에 입사하는 입사광의 반경이다. ΔR 는 SESAM 반사율의 변조 깊이이다. 단일모드 광섬유 레이저의 광은 가우시안 분포로 가정할 수 있기 때문에 $\omega_a = 2\lambda f_2 \pi D$ 의 관계를 갖는다. 여기서, λ 는 레이저의 파장이며 D 는 렌즈 L_2 에 입사하는 광의 직경이다. 즉, P_{s-s} 는 식 (1)에 의해 초점거리 (f_2)에 비례한다. 비록 식 (1)이 고체 레이저에 대한 모드 잠금 펄스 발진 조건에 대해 유도된 것이지만, 식 (1)과 같이 최소 레이저 광 세기 (P_{s-s})는 렌즈 초점거리 (f_2)에 비례하였다. 실험 결과로부터 낮은 출력의 펄스용 다이오드 레이저를 이용해 모드잠금을 하기 위해서는 P_{s-s} 가 낮도록 f_2 을 짧게 레이저 설계해야 하지만 이로 인해 안정적인 모드 잠금을 위한 펄스 광 세기 구간 줄어들게 됨을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 모드 잠금을 위한 소자로서 반도체 포화 흡수체 거울을 이용하고 이터븀 첨가 광섬유를 이득 매질로 사용하는 수동 모드 잠금된 광섬유 레이저를 구성하였다. Q 스위칭 불안정성을 억제하고 안정적인 연속발진 모드 잠금을 얻기 위해 SESAM에 입사하는 빔의 반경을 변경하면서 레이저 출력특성을 조사하였다. 본 실험의 결과, 집속 렌즈 초점거리 (f_2)의 값이 증가할수록 자기발진에 의한 모드 잠금이 일어나는 최소 레이저 출력이 증가하였고 안정적인 모드 잠금을 위한 펄스 광 세기 구간이 증가함을 확인하였다. 또한 모드 잠금된 펄스의 스펙트럼 선폭도 집속 렌즈 초점거리가 증가할수록 증가함을 알 수 있었다.

본 실험 결과는 SESAM에 광을 집속하기 위해 사용한 렌즈 L_2 의 초점거리와 레이저 발진 스펙트럼 선폭, 모드 잠금

이 일어나기 위한 최소 레이저 출력 조건, 안정적인 모드 잠금을 위한 펄스 광 세기 구간 등의 상관관계를 보여주었다. 따라서 레이저 설계자가 이러한 상관관계를 활용하면 SESAM을 이용한 선형의 모드 잠금된 광섬유 레이저에 대한 최적 설계를 효율적으로 할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts, S. Sanders, S. Bicknese, R. Dohle, E. Wolak, P. S. Yeh, and E. Zucker, "110 W fiber laser," *Electron. Lett.* **35**, 1158-1160 (1990).
2. H. Lim, F. Ö. Ilday, and F. W. Wise, "Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control," *Opt. Express* **10**, 1497-1502 (2002).
3. J. Yao, J.-P. Yao, Y. Wang, S. C. Tjin, Y. Zhou, Y. L. Lam, J. Liu, and C. Lu, "Active mode locking of tunable multi-wavelength fiber ring laser," *Opt. Comm.* **191**, 341-345 (2001).
4. O. G. Okhotnikov, L. Gomes, N. Xiang, and T. Jouhti, "Mode-locked ytterbium fiber laser tunable in the 980-1070-nm spectral range," *Opt. Lett.* **28**, 1522-1524 (2003).
5. M. Zhang, L. L. Chen, C. Zhou, Y. Cai, L. Ren, and Z. G. Zhang, "Mode-locked ytterbium-doped linear-cavity fiber laser operated at low repetition rate," *Laser Phys. Lett.* **6**, 657-660 (2009).
6. A. Chong, J. Buckley, W. Renninger, and F. Wise, "All-normal-dispersion femtosecond fiber laser," *Opt. Express* **10**, 10095-100100 (2006).
7. C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, and U. Keller, "Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking," *J. Opt. Soc. Am. B* **16**, 46-56 (1999).