

High-power Yb Fiber Laser with 3.0-kW Output

Jong Seon Park^{1,2*}, Eun Ji Park^{3*}, Ye Jin Oh¹, Hoon Jeong^{2†}, Ji Won Kim^{1†},
Yeji Jung⁴, Kangin Lee⁴, Yongsoo Lee⁴, and Joonyong Cho⁴

¹Department of Photonics and Nanoelectronics, University of Hanyang ERICA, Ansan 15588, Korea

²Manufacturing System R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan 31056, Korea

³Department of Applied Physics, University of Hanyang ERICA, Ansan 15588, Korea

⁴Laser and Sensor Systems Team, Defense R&D Center, Hanwha Co., Seongnam 13488, Korea

(Received May 27, 2021; Revised June 24, 2021; Accepted June 26, 2021)

We report high-power continuous-wave operation of a Yb-doped fiber laser at 1070 nm, pumped by high-power laser diodes at 976 nm. Based on theoretical calculation of the stimulated Raman scattering and temperature distribution in the fiber, we construct a bidirectionally pumped Yb-fiber-laser system incorporating a pair of fiber Bragg gratings and a cladding light stripper. The fiber laser yields 3.0 kW of continuous-wave output at 1070 nm in a diffraction-limited beam with $M^2 \approx 1.26$ for 4.1 kW of incident pump power, corresponding to a slope efficiency of 81.5%. The prospects for further power scaling are discussed.

Keywords: Fiber laser, High power fiber laser, Infrared laser, Ytterbium laser

OCIS codes: (060.2320) Fiber optics amplifiers and oscillators; (140.3480) Lasers, diode-pumped; (140.3510) Lasers, fiber; (140.3615) Lasers, ytterbium

3.0 kW 고출력 발진 단일 모드 Yb 광섬유 레이저

박종선^{1,2*} · 박은지^{3*} · 오예진¹ · 정 훈^{2†} · 김지원^{1†} · 정예지⁴ · 이강인⁴ · 이용수⁴ · 조준용⁴

¹한양대학교 에리카 나노광전자학과

☎ 15588 경기도 안산시 한양대학로 55

²한국생산기술연구원 청정생산시스템연구소

☎ 31056 충청남도 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89

³한양대학교 ERICA 응용물리학과

☎ 15588 경기도 안산시 한양대학로 55

⁴(주)한화종합연구소 레이저센터

☎ 13488 경기도 성남시 분당구 판교로 305 한화미래기술연구소

(2021년 5월 27일 받음, 2021년 6월 24일 수정본 받음, 2021년 6월 26일 게재 확정)

본 논문에서는 최고 출력 3.0 kW 발진 단일 모드 이터븀(ytterbium, Yb) 첨가 광섬유 레이저에 대해 보고한다. 고출력 광섬유 레이저의 출력을 제한하는 주된 요소인 유도 라만 산란 문턱 값과 광섬유 내 온도 분포를 계산하고 이를 바탕으로 양방향 펌프 구조의 단일 공진기 Yb 광섬유 레이저 시스템을 제작하였다. 그 결과 4.1 kW의 펌프 출력에서 최고 출력 3.0 kW의 레이저 빔을 얻을 수 있었고, 그때의 기울기 효율은 81.5%로 계산되었다. 최고 출력에서 측정된 출력 빔의 빔질(M^2)은 1.26으로 단일 공간 모드 빔 출력 특성을 가지고 있음을 확인하였고, 유도 라만 산란 및 횡모드 불안정 현상은 관측되지 않았다. 본 연구에서 얻은 광섬유 레이저 출력 결과는 지금까지 국내에서 보고된 다이오드

*These authors contributed equally to this paper as the first author.

†Corresponding author E-mail: hoonj@kitech.re.kr, ORCID: 0000-0001-6149-8461

Corresponding author E-mail: jwk7417@hanyang.ac.kr, ORCID: 0000-0002-9451-1789

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

레이저로 펌핑한 광섬유 레이저 출력 중 가장 높은 출력이며, 향후 더 높은 출력을 얻기 위한 방법에 대해 논의하고자 한다.

Keywords: 광섬유 레이저, 고출력 광섬유 레이저, 근적외선 레이저, Yb 레이저

OCIS codes: (060.2320) Fiber optics amplifiers and oscillators; (140.3480) Lasers, diode-pumped; (140.3510) Lasers, fiber; (140.3615) Lasers, ytterbium

I. 서 론

회절 한계의 빔 특성을 가지는 단일 모드 고출력 광섬유 레이저는 2004년 이중 클래딩 구조의 이터븀(ytterbium, Yb) 첨가 광섬유를 이용하여 1 μm 대역에서 1 kW 급 연속 발진 레이저 출력이 구현된 이후^[1], 눈부신 발전을 거듭하여 현재 수많은 응용 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 청정 생산 가공, 정밀 가공, 생산 자동화 등이 중요시되는 산업 현장과 드론, 미사일, 지뢰 등 날이 갈수록 소형화, 첨단화되는 적의 무력에 효율적으로 대응하려는 국방 분야에서는 최소 수 kW에서 수십 kW에 이르는 고출력 광섬유 레이저 시스템의 필요성이 점차 증대되고 있으며 이와 관련해서 많은 연구 개발이 이루어지고 있다^[2-5]. 일반적으로 광섬유 레이저 시스템에서 고출력을 얻는 방법은 크게 2가지로, 첫 번째는 희토류 이온이 첨가된 이득 광섬유와 광섬유 회절 격자(FBG, fiber Bragg grating)를 사용하여 레이저 공진기 시스템을 구축해서 레이저를 발진시키는 방법이고, 두 번째는 희토류 첨가 이득 광섬유 증폭기로 MOPA (master oscillator power amplifier) 시스템을 구축하여 저출력의 레이저 씨앗 빔 출력을 단계적으로 증폭시키는 방법이 있다. 전자의 구조인 공진기 형태의 광섬유 레이저 시스템은 구조가 간단하고 효율이 높으며 비선형 광학 효과를 최소화할 수 있는 장점이 있지만, 레이저 동작 시 발생하는 모든 열이 광섬유 공진기 내부에 집중되므로 출력 및 빔 특성의 변화 뿐만 아니라 광섬유와 부품의 열 손상이 발생할 수 있다. 최근 들어 구조적으로 최적화된 Yb 광섬유의 사용과 함께, 성능이 크게 향상된 광섬유 레이저 부품들을 사용하여 공진기 구조를 가진 광섬유 레이저 시스템의 출력이 크게 향상되었다. 보고에 따르면 2018년 독일과 일본에서 다이오드 레이저 펌핑 Yb 광섬유 공진기에서 약 5 kW의 단일 횡모드 레이저 출력을 얻는데 성공하였고^[6,7], 2020년에는 일본 후지쿠라사 연구 그룹에서 8 kW를 넘어서는 단일 횡모드 Yb 광섬유 레이저 시스템을 보고한 바 있다^[8]. 하지만 이들 연구 그룹들은 대부분 자체적으로 개발한 Yb 첨가 광섬유와 광부품들을 사용하였으므로 다른 연구 그룹에서는 같은 방법으로 목표 사양을 획득하기 매우 어렵다. 레이저 출력을 증강시키는 다른 방법인 광섬유 레이저 MOPA 시스템은 씨앗 레이저 빔의 특성을 유지하면서 단계적으로 출력 증폭을 시킴으로써, 이득 매질에서 발생하는 열을 분산시키고, 광섬유 레이저 부품들의 출력 한계치에 맞추어 시스템을 구축할 수 있는 장점이 있다. 또한, 시드 레이저 신호의 좁은 선폭을 유지하며 고출력을 얻을 수 있으므로, 파장 빔 결합 혹은 결맞음 결

합 방식으로 여러 개의 레이저 빔들을 모아서 수십 kW의 회절 한계 레이저 빔을 얻을 수 있다^[9,10]. 하지만 긴 길이의 광섬유 사용으로 인해 유도 브릴루앙 산란(SBS, stimulated Brillouin scattering), 유도 라만 산란(SRS, stimulated Raman scattering) 등의 비선형 광학 현상이 레이저 출력 및 빔 특성의 한계를 결정하게 된다^[11].

고출력의 광섬유 레이저 기술을 확보하기 위해 세계적으로 많은 노력과 투자가 이루어지고 있고 미국, 중국, 독일, 일본 등 선진국을 중심으로 우수한 결과들이 보고되고 있지만^[6-8,12-19], 국내의 고출력 광섬유 레이저 개발은 선진국 대비 뒤쳐져 있는 형편이다. 다행히 최근 들어 국방 관련 고출력 광섬유 레이저의 중요성이 대두되면서 산학연을 중심으로 관련 레이저 기술에 대한 연구가 활발히 이루어져 1 kW 급 탠덤 펌핑 레이저^[20], 1.5 kW 급 협대역 레이저^[21] 및 2 kW 급 빔 결합 기술이^[22] 보고되었으며, 국방과학기술연구소에서 선폭 10 GHz 이내 협대역 레이저로는 세계적으로 가장 높은 출력인 2.05 kW 출력의 Yb 광섬유 MOPA 시스템을 보고하는 등^[23] 우수한 연구 결과가 국내에서도 보고되고 있다.

본 연구에서는 다이오드 레이저로 펌핑한 공진기 구조의 고출력 Yb 광섬유 레이저 시스템을 구축하고 출력 특성을 보고하고자 한다. 펌핑 방식에 따른 열 분포와 SRS 특성을 이론적으로 조사한 후, 이를 바탕으로 양방향 펌핑 방식의 공진기 구조를 가진 Yb 광섬유 레이저 시스템을 구축하고 최종 3.0 kW의 고출력을 구현하는데 성공하였다.

II. 실험 및 결과

본 연구에서 채택한 고출력 Yb 광섬유 레이저 구조는 FBG를 사용한 일반적인 공진기 구조를 가지고 있다. 광섬유 레이저에서 출력을 제한하는 주요 원인 중 하나는 SRS, SBS, 자기 위상 변조(SPM, self-phase modulation) 등의 비선형 광학 현상인데 그 중 SBS와 SRS는 레이저 출력의 불안정을 야기할 뿐 아니라 레이저 시스템의 손상을 유도하므로 고출력 광섬유 레이저 시스템을 구축할 때 반드시 고려해야 한다. 공진기 구조의 광섬유 레이저에서는 레이저 출력의 선폭이 넓으므로 SBS보다는 SRS로 인한 문제가 더 쉽게 발생한다. 따라서 이를 알아보기 위하여 다음 식을 사용하여 광섬유 내 레이저 신호에 대한 SRS 문턱값을 계산하였다^[11].

$$P_{\text{th}} \approx \frac{16A_{\text{eff}}}{gR L_{\text{eff}}} \quad (1)$$

여기서 A_{eff} 는 유효단면적(effective area), L_{eff} 는 유효길이(effective length), g_R 은 라만 이득 계수로 본 연구에서는 실리카의 값인 0.5×10^{-13} m/W로 설정하였다^[24]. 그림 1은 코어 직경 20 μm 의 실리카 광섬유의 SRS 문턱 값을 계산한 결과로서 최고 출력 3.0 kW를 얻기 위해서는 공진기부터 레이저 출력이 나오는 광섬유 끝 단까지의 총 길이를 약 26 m 이하로 유지해야 한다는 것을 알 수 있다.

공진기 구조의 고출력 광섬유 레이저를 설계할 때 반드시 고려해야 할 또 다른 중요한 변수는 이득 광섬유의 절대 온도 및 온도 분포이다. 잘 알려진 바와 같이 Yb 광섬유 레이저는 높은 양자 효율을 가지고 이득 매질 길이가 수십 미터까지 가능한 도파로 구조를 가지고 있기 때문에 발생하는 열의 제거에 탁월한 특성을 가지고 있다. 하지만 비선형 광학 현상으로 인해 목표 출력에 따라 제한된 길이의 광섬유를 사용해야 하므로 고출력 레이저 동작 시 발생하는 열로 인한 이득 광섬유 온도 상승은 피할 수 없다. 그와 동시에 광섬유의 방사형 및 종방향으로 형성되는 온도 기울기 때문에 출력 및 모드 불안정, 빔질 저하, 광섬유 코팅 손상 등 여러가지 심각한 문제들이 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 킬로와트급 고출력 광섬유 레이저의 안정된 발진과 동작을 위해서는 이득 광섬유의 절대 온도 및 온도 분포가 매우 중요하므로 펌핑 출력 및 구조에 따른 광섬유의 코어 온도를 이론적으로 계산하였다. 열원은 양자 결합만 고려하고 광섬유 코어 단면 내 열 분포가 일정하다고 가정할 경우 광섬유 코어 중심 온도 T_0 는 다음 식으로 계산할 수 있다^[25,26].

$$T_0 = T_c + \frac{qa^2}{2hc} + \frac{qa^2}{4k_1} + \frac{qa^2}{2k_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{qa^2}{2k_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right) \quad (2)$$

여기서 a , b , c 는 각각 코어, 내부 클래딩, 외부 클래딩(폴리머 코팅)의 반지름, k_1 , k_2 , k_3 는 각각 코어, 내부 클래딩, 외부 클래딩의 열전도도(thermal conductivity), T_c 는 광섬유 외부 냉각 온도, h 는 외부 클래딩과 외부 냉각 환경 사이의 대

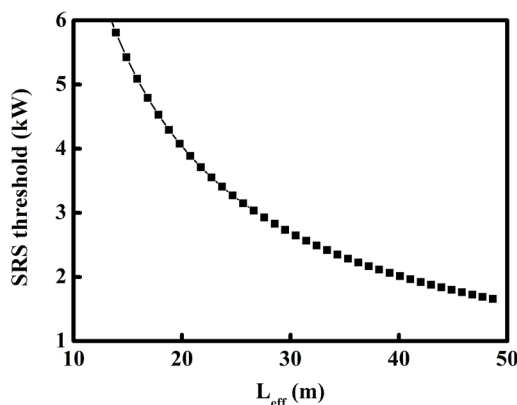


Fig. 1. Theoretical calculation of the SRS threshold as a function of fiber length.

류 열전달 계수(convective heat transfer coefficient)이다. 그리고 q 는 이득 광섬유에서 발생하는 단위 길이당 발열량(heat power density)으로 다음 식과 같다.

$$q = (1 - 10^{-\alpha \cdot dL/10}) \frac{P(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s})}{\pi a^2} \quad (3)$$

여기서 α 는 단위 길이당 펌프 출력 흡수율, L 은 광섬유의 길이, P 는 입사된 펌프 출력, λ_s 와 λ_p 는 각각 신호광과 펌프광의 파장이다. Fiber Power 소프트웨어(RP Photonics, Bad Dürreim, Germany)를 사용하여 코어 직경 20 μm , 클래딩 직경 400 μm 의 Yb 첨가 광섬유 20 m에 4.1 kW의 펌핑 출력이 가해졌을 때 단방향(순방향) 펌핑과 양방향 펌핑 구조에서 Yb 광섬유 내 펌프 출력의 분포를 시뮬레이션하였고, 이를 바탕으로 식 (2)와 (3)으로부터 Yb 광섬유 위치 별 온도를 계산하였다. 계산에서 사용한 변수들의 값은 표 1에서 찾아볼 수 있다.

계산 결과 그림 2에서 보는 바와 같이 단방향 펌핑 구조의 경우 광섬유 코어의 최고 온도는 68.9 $^{\circ}\text{C}$, 양방향 펌핑의 경우에는 최고 온도 45.3 $^{\circ}\text{C}$ 로, 기대했던 대로 양방향 펌핑 구조

Table 1. Main parameters for calculation of SRS and temperature distribution in Yb doped fibers

Core radius (a)	10 μm
Cladding radius (b)	200 μm
Coating radius (c)	275 μm
Core thermal conductivity (k_1)	1.38 W/mK
Cladding thermal conductivity (k_2)	1.38 W/mK
Coating thermal conductivity (k_3)	0.2 W/mK
Coolant temperature (T_c)	20 $^{\circ}\text{C}$
Convective heat transfer coefficient (h)	100 W/m ² K
Pump absorption coefficient (α)	1.2 dB/m
Signal wavelength (λ_s)	1070 nm
Pump wavelength (λ_p)	976 nm

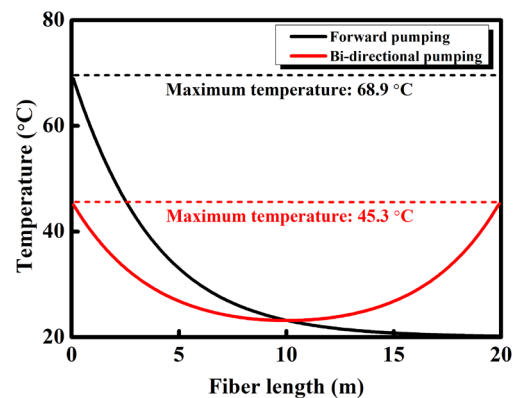


Fig. 2. Calculated temperature distribution along the Yb fiber in the forward pumping and bidirectional pumping configurations for incident pump power of 4.0 kW.

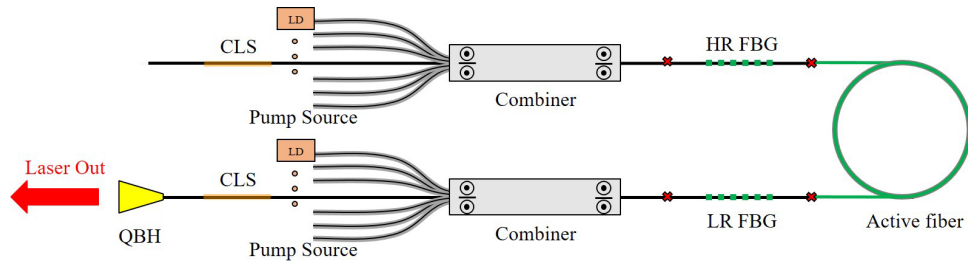


Fig. 3. Schematic diagram of the Yb fiber laser.

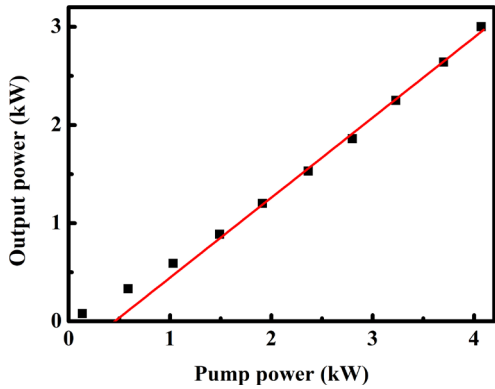


Fig. 4. Signal output power as a function of incident pump power for the Yb fiber laser.

가 단방향 펌핑 구조 대비 최고 온도가 약 34% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 단방향 펌핑 구조의 경우 펌프빔이 입사되어 가장 많은 펌프 흡수가 이루어지는 광섬유 전반부와 흡수가 거의 없는 광섬유 후반부의 온도 차이가 약 48.7 °C 정도로 큰 반면, 양방향 펌핑 구조에서는 가장 온도가 높은 부분과 낮은 부분의 온도 차이가 약 22.1 °C 정도 밖에 되지 않아 비교적 균일한 온도 분포를 가지고 있었다. 즉, 단방향 펌핑 구조에 비해 양방향 펌핑 구조에서 광섬유의 최고 온도가 낮고 균일한 온도 분포를 가짐으로써 열 문제를 크게 완화시킬 수 있는 장점이 있다는 것을 이론적으로 확인할 수 있다.

이론적 SRS 문턱 값과 온도 분포 결과를 바탕으로 본 실험에서 구축한 양방향 펌핑 구조의 Yb 광섬유 레이저 모식도는 그림 3과 같다. 펌핑 광원으로 976 nm 파장의 광섬유 결합 다이오드 레이저를 순방향 및 역방향 펌프/시그널 광섬유 결합기에 각각 연결하여 총 4.1 kW 이상의 펌핑 출력을 확보하였다. 이득 광섬유로는 코어 직경 20 μm, 클래딩 직경 400 μm을 가지고 976 nm 파장에서 약 1.2 dB/m의 흡수율을 가지는 Yb 첨가 광섬유(Nufern Inc., CT, USA)를 20 m 사용하였으며, 효율적인 냉각과 고차모드 발진을 방지하기 위해 직경 100 mm의 실린더형 기구부에 코일링하여 수냉 방법을 이용해 냉각시켰다. 그리고 레이저 발진을 유도하기 위하여 1070 nm에서 중심 파장을 가지고 반사율 99.5%인 고반사율 광섬유 회절격자(HR FBG, high reflection FBG)와 반사율 9.5%인 저반사율 광섬유 회절격자(LR FBG, low reflection

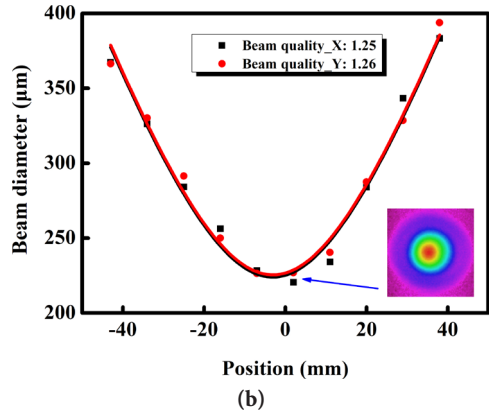
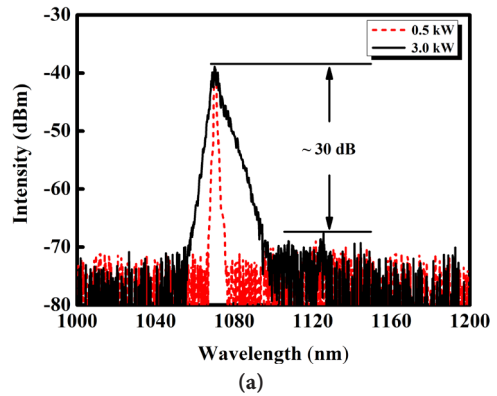


Fig. 5. Characteristics of the fiber laser. (a) Output spectrum at the signal power of 500 W and 3.0 kW. (b) Beam quality measurement at the maximum signal power of 3.0 kW.

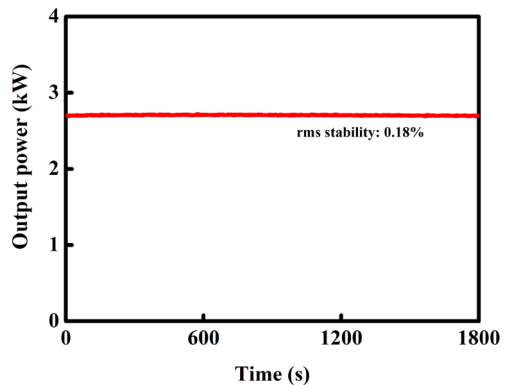


Fig. 6. Output power stability measured at 2.7 kW for 30 minutes. The RMS stability value was calculated to be 0.18%.

FBG)를 Yb 첨가 광섬유 양 끝 단에 연결하였고, 각각의 반치 전폭(full width at half maximum)은 3.0 nm와 1.5 nm 이었다. 흡수되지 않는 펄프 출력은 클래딩 광 제거기(cladding light stripper)를 사용하여 제거하였고, 이후 레이저 신호광이 출력되는 순방향의 끝 단은 수냉식 석영 헤드 결합기(quartz block head)를 사용하여 고출력으로 인한 출력단 면에서의 손상을 방지하였으며, 역방향의 끝 단은 역반사(back reflection)를 최소화하기 위해 직경 2 mm의 endcap을 연결하였다.

그림 3과 같이 구축된 레이저 시스템으로부터 얻은 펄프 출력 대비 레이저 출력의 그래프는 그림 4에서 볼 수 있다. 입사된 펄프 출력이 4.1 kW일 때 1070 nm에서 최고출력 3.0 kW 레이저 출력을 얻을 수 있었고 이때의 입사된 펄프 출력 대비 기울기 효율은 81.5%이었으며 역방향으로는 약 16.7 W 가 출력되었다. 그림 5(a)는 레이저 출력에 따른 광 스펙트럼으로, 500 W 출력에서 측정된 광 스펙트럼은 중심 파장 1070 nm에서 1.0 nm 반치 전폭을 보였으나 3.0 kW 최고 출력에서는 SPM에 의해 반치 전폭이 4.0 nm으로 증가하였다. 최고 출력에서의 광 스펙트럼은 1120 nm 근처에서 약한 SRS 신호가 나타난 것을 볼 수 있지만 그 크기가 레이저 신호광 대비 30 dB 이상 매우 작으므로 무시할 수 있다. 최고 출력에서 측정된 레이저 빔의 빔질(M^2)은 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 각각 1.25, 1.26으로 회절 한계에 가까운 빔 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 그림 6은 2.7 kW 출력에서 30분 동안 측정된 레이저의 출력 변화인데 출력 안정도가 0.18% (RMS)로 매우 안정적인 레이저 발진을 보여주고 있으며, 출력빔의 횡 모드 불안정 현상(TMI, transverse mode instability)은 관측되지 않았다.

III. 결 론

본 연구에서는 다이오드 레이저로 펌핑한 양방향 펌핑 공기 기 구조의 Yb 광섬유 레이저에서 3.0 kW 출력을 구현하고 출력 특성을 분석하였다. 광섬유 길이에 따른 SRS와 광섬유 온도 분포를 이론적으로 계산하여 3.0 kW 이상의 고출력을 구현하기 위해서는 양방향 펌핑 구조가 유리하고 총 광섬유 길이는 약 26 m 이하가 적합함을 확인하였다. 이론적 계산을 바탕으로 구축한 Yb 광섬유 레이저 시스템으로부터 최고 출력 3.0 kW를 얻을 수 있었으며, 측정된 레이저 출력빔의 빔질(M^2)은 1.26 이하로, 고출력, 고효율의 회절 한계 레이저 빔이 안정적으로 발진되는 것을 확인하였다. 본 연구에서 구축한 Yb 광섬유 레이저의 출력 한계는 사용 가능한 펄프 출력에 의해 결정되었다. 그와 더불어 사용한 광섬유 부품들의 성능 및 한계가 최고 출력 구현에 매우 중요하였을 뿐 아니라, 부품들의 성능이 광섬유 접합 방식 및 냉각 정도에 따라 크게 의존하

는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 더 높은 출력을 견딜 수 있는 광섬유 부품들을 사용하고, 광섬유 접합 및 냉각 등의 과정을 최적화한 후 더 높은 펄프 출력을 가하면, 향후 더 높은 레이저 출력을 얻을 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

References

1. Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson, "Ytterbium doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power," *Opt. Express* **12**, 6088-6092 (2004).
2. S. Son, H. Park, and K. H. Lee, "Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection," *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **42**, 889-897 (2002).
3. C. Fang, J. Xin, W. Dai, J. Wei, J. Wu, and Y. Song, "Deep penetration laser welding of austenitic stainless steel thick-plates using a 20 kW fiber laser," *J. Laser Appl.* **32**, 012009 (2020).
4. Y. Kawahito, H. Wang, S. Katayama, and D. Sumimori, "Ultra high power (100 kW) fiber laser welding of steel," *Opt. Lett.* **43**, 4667-4670 (2018).
5. K. Ludewigt, A. Liem, U. Stuhr, and M. Jung, "High-power laser development for laser weapons," *Proc. SPIE* **11162**, 116207 (2019).
6. F. Möller, R. G. Krämer, C. Matzdorf, S. Nolte, M. Strecker, F. Stutzki, M. Plötner, V. Bock, T. Schreiber, and A. Tünnermann, "Comparison between bidirectional pumped Yb-doped all-fiber single-mode amplifier and oscillator setup up to a power level of 5 kW," in *Advanced Solid State Lasers* (Optical Society of America, 2018), paper AM2A.3.
7. K. Shima, S. Ikoma, K. Uchiyama, Y. Takubo, M. Kashiwagi, and D. Tanaka, "5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing," *Proc. SPIE* **10512**, 105120C (2018).
8. Y. Wang, R. Kitahara, W. Kiyoyama, Y. Shirakura, T. Kurihara, Y. Nakanish, T. Yamamoto, M. Nakayama, S. Ikoma, and K. Shima, "8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad," *Proc. SPIE* **11260**, 1126022 (2020).
9. E. Honea, R. S. Afzal, M. Savage-Leuchs, J. Henrie, K. Brar, N. Kurz, D. Jander, N. Gitkind, D. Hu, C. Robin, A. M. Jones, R. Kasinadhuni, and R. Humphreys, "Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling," *Proc. SPIE* **9730**, 97300Y (2016).
10. M. Müller, C. Aleshire, H. Stark, J. Buldt, A. Steinkopff, A. Klenke, A. Tünnermann, and J. Limpert, "10.4 kW coherently-combined ultrafast fiber laser," *Proc. SPIE* **11260**, 112600B (2020).
11. J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach, M. Y. Shverdin, E. A. Stappaerts, A. K. Sridharan, P. H. Pax, J. E. Heebner, C. W. Siders, and C. P. J. Barty, "Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power," *Opt. Express* **16**, 13240-13266 (2008).
12. B. Yang, H. Zhang, X. Wang, R. Su, R. Tao, P. Zhou, X. Xu, and Q. Lu, "Mitigating transverse mode instability in a single-end pumped all-fiber laser oscillator with a scaling power of up

- to 2kW,” *J. Opt.* **18**, 105803 (2016).
13. A. Rosales-Garcia, H. Tobioka, K. Abedin, H. Dong, Z. Váralyay, Á. Szabó, T. Taunay, S. P. Sullivan, and C. Headley, “2.1 kW single mode continuous wave monolithic fiber laser,” *Proc. SPIE* **9344**, 93441G (2015).
 14. S. Ikoma, H. K. Nguyen, M. Kashiwagi, K. Uchiyama, K. Shima, and D. Tanaka, “3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing,” *Proc. SPIE* **10083**, 100830Y (2017).
 15. B. Yang, H. Zhang, C. Shi, R. Tao, R. Su, P. Ma, X. Wang, P. Zhou, X. Xu, and Q. Lu, “3.05 kW monolithic fiber laser oscillator with simultaneous optimizations of stimulated Raman scattering and transverse mode instability,” *J. Opt.* **20**, 025802 (2018).
 16. P. Yan, Y. Huang, J. Sun, D. Li, X. Wang, M. Gong, and Q. Xiao, “3.1 kW monolithic MOPA configuration fibre laser bidirectionally pumped by non-wavelength-stabilized laser diodes,” *Laser Phys. Lett.* **14**, 080001 (2017).
 17. H. Yu, H. Zhang, H. Lv, X. Wang, J. Leng, H. Xiao, S. Guo, P. Zhou, X. Xu, and J. Chen, “3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser,” *Appl. Opt.* **54**, 4556-4560 (2015).
 18. H. Lin, R. Tao, C. Li, B. Wang, C. Guo, Q. Shu, P. Zhao, L. Xu, J. Wang, F. Jing, and Q. Chu, “3.7 kW monolithic narrow linewidth single mode fiber laser through simultaneously suppressing nonlinear effects and mode instability,” *Opt. Express* **27**, 9716-9724 (2019).
 19. F. Beier, C. Hupel, S. Kuhn, S. Hein, J. Nold, F. Proske, B. Sattler, A. Liem, C. Jauregui, J. Limpert, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, “Single mode 4.3 kW output power from a diode pumped Yb-doped fiber amplifier,” *Opt. Express* **25**, 14892-14899 (2017).
 20. Y. J. Oh, J. S. Park, J. W. Kim, and H. Jeong, “Tandem-pumped Yb-doped fiber lasers with 1 kW output,” in *Proc. Advanced Laser and Their Applications (Jeju, Korea, May 2018)*, P026.
 21. S. Jeong, K. Kim, T. Kim, S. Lee, H. Yang, J. Lee, K. H. Lee, J. H. Lee, and M.-S. Jo, “All-fiber 1.5-kW-class single-mode Yb-doped polarization-maintaining fiber laser with 10 GHz linewidth,” *Korean J. Opt. Photon.* **31**, 223-230 (2020).
 22. H. Jeong, K. H. Lee, J. Lee, D.-J. Kim, J. H. Lee, and M. Jo, “High-beam-quality 2-kW-class spectrally combined laser using narrow-linewidth ytterbium-doped polarization-maintaining fiber amplifiers,” *Korean J. Opt. Photon.* **31**, 218-222 (2020).
 23. J. Lee, K. H. Lee, H. Jeong, M. Park, J. H. Seung, and J. H. Lee, “2.05 kW all-fiber high-beam-quality fiber amplifier with stimulated Brillouin scattering suppression incorporating a narrow-linewidth fiber-Bragg-grating-stabilized laser diode seed source,” *Appl. Opt.* **58**, 6251-6256 (2019).
 24. H. Zhang, H. Xiao, P. Zhou, X. Wang, and X. Xu, “High power Yb-Raman combined nonlinear fiber amplifier,” *Opt. Express* **22**, 10248-10255 (2014).
 25. A. Hardy and R. Oron, “Signal amplification in strongly pumped fiber amplifiers,” *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 307-313 (1997).
 26. Y. Fan, B. He, J. Zhou, J. Zheng, H. Liu, Y. Wei, J. Dong, and Q. Lou, “Thermal effects in kilowatt all-fiber MOPA,” *Opt. Express* **19**, 15162-15172 (2011).