

# Linearly Polarized 1-kW 20/400- $\mu\text{m}$ Yb-doped Fiber Laser with 10-GHz Linewidth

Yeji Jung<sup>†</sup>, Minwan Jung, Kangin Lee, Taewoo Kim, Jae-Ihn Kim, Yongsoo Lee, and Joonyong Cho

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

(Received December 9, 2020; Revised January 28, 2021; Accepted April 5, 2021)

We have developed a linearly polarized high-power Yb-doped fiber laser in the master oscillator power amplifier (MOPA) scheme for efficient spectral beam combining. We modulated the phase of the seed laser by pseudo-random binary sequence (PRBS), with the bit length optimized to suppress stimulated Brillouin scattering (SBS), and subsequently amplified seed power in a 3-stage amplifier system. We have constructed by coiling the polarization-maintaining (PM) Yb-doped fiber, with core and cladding diameters of 20  $\mu\text{m}$  and 400  $\mu\text{m}$  respectively, to a diameter of 9–12 cm for suppression of the mode instability (MI). Finally, we obtained an output power of 1.004 kW with a slope efficiency of 83.7% in the main amplification stage. The beam quality factor  $M^2$  and the polarization extinction ratio (PER) were measured to be 1.12 and 21.5 dB respectively. Furthermore, the peak-intensity difference between the Rayleigh signal and SBS signal was observed to be 2.36 dB in the backward spectra, indicating that SBS is successfully suppressed. In addition, it can be expected that the MI does not occur because not only there is no decrease in slope efficiency, but also the beam quality for each amplified output is maintained.

**Keywords:** Fiber laser, Fiber amplifier, Stimulated Brillouin scattering

**OCIS codes:** (140.3280) Laser amplifiers; (140.3510) Lasers, fiber

## 선편광된 10 GHz 선폭의 1 kW급 20/400- $\mu\text{m}$ 이터븀 첨가 광섬유 레이저

정예지<sup>†</sup> · 정민완 · 이강인 · 김태우 · 김재인 · 이용수 · 조준용

(주)한화 종합연구소 레이저개발2팀

Ⓢ 13488 경기도 성남시 분당구 판교로 305 한화미래기술연구소

(2020년 12월 9일 받음, 2021년 1월 28일 수정본 받음, 2021년 4월 5일 게재 확정)

본 연구에서는 다파장 빔결합을 위한 master oscillator power amplifier (MOPA) 구조의 선편광 고효율 이터븀 첨가 광섬유 레이저를 개발하였다. 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering, SBS)을 억제하기 위하여 pseudo-random binary sequence (PRBS) 신호로 위상 변조 및 비트길이를 최적화한 선폭 약 10 GHz의 시드 레이저를 구현하였으며, 이를 이용하여 3단 증폭을 하였다. 주 증폭단에서는 모드 불안정성 현상(mode instability, MI)의 문턱값을 높이기 위하여 코어 및 클래딩의 직경이 각각 20  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ 인 편광유지(polarization maintaining, PM) 이터븀 첨가 광섬유를 이용하고 지름이 약 9–12 cm인 나선형 홈에 적용하였다. 그 결과, 입사된 여기광 대비 기울기 효율이 83.7%인 1.004 kW의 레이저 출력을 얻었다. 또한, 빔품질( $M^2$ )과 편광소광율(polarization extinction ratio, PER)은 각각 1.12와 21.5 dB로 측정되었다. 더욱이, 역방향 스펙트럼의 레일리 신호와 SBS 신호의 첨두 세기 비율은 2.36 dB로 관측되어, SBS가 완화된 레이저 구현을 확인하였다. 또한 증폭 출력에 따라 기울기 효율 및 빔품질의 저하가 없어 모드불안정이 발생하지 않음을 확인하였다.

**Keywords:** 광섬유 레이저, 광섬유 증폭기, 유도 브릴루앙 산란

**OCIS codes:** (140.3280) Laser amplifiers; (140.3510) Lasers, fiber

### I. 서 론

광섬유 레이저는 다양한 장점들과 고효율 다이오드의 발전

으로 인하여 지난 몇십 년간 눈부신 발전을 하며 통신, 산업, 의료, 방산 등 다양한 분야에서 연구 개발 및 응용되고 있다<sup>[1-3]</sup>. 특히, 광섬유 레이저는 고체 레이저 대비 장거리의 도파

<sup>†</sup>E-mail: yejijung@hanwha.com, ORCID: 0000-0002-1307-8603

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

로를 이용하여 방열이 탁월하고 우수한 빔 특성을 가진다. 또한 광섬유 기반 부품의 발전 등으로 인하여 소형화가 가능하며 높은 안정성을 가진 고출력, 고효율의 레이저 구현이 가능하다. 이러한 많은 이점들로 인해 출력 증대에 대한 연구가 활발히 진행되어 다이오드 펌핑 방식으로는 수 kW<sup>[4-7]</sup>, 텀덤 펌핑 방식으로는 ~20 kW 출력의 단일모드 연속 발진 레이저<sup>[8]</sup>까지 보고되고 있다. 하지만 상대적으로 작은 코어에서 전파되는 높은 빔 세기로 인하여 비선형 현상, 열적 손상, 열로 인한 빔의 왜곡, 여기광 레이저 다이오드 및 광부품의 손상 등의 문제들이 야기되어 단일 광섬유 레이저에서의 증대가 제한된다<sup>[2]</sup>.

이러한 출력 한계를 극복하여 보다 높은 출력 및 우수한 빔품질의 레이저를 구현할 수 있는 방법 중 하나는 빔 결합을 이용한 출력 증대로서, 이는 크게 결맞음 빔결합(coherent beam combining)과 비결맞음 빔결합(incoherent beam combining)으로 나눌 수 있다<sup>[9,10]</sup>. 비결맞음 빔결합의 대표적인 빔결합 방식으로 알려진 다파장 빔결합(spectral beam combining) 방식은 결맞음 빔결합의 복잡한 위상 제어가 필요 없어 시스템 구성이 단순하고, 높은 결합효율과 더불어 우수한 빔품질 및 높은 휘도를 가진 고출력 빔결합이 가능하다. 이러한 장점들을 가진 다파장 빔결합 방식은 1999년 이후부터 연구가 진행<sup>[11]</sup>되어 2010년 후반부터는 이를 이용한 수십~수백 kW급의 광섬유 레이저 개발이 이루어지고 있다<sup>[12-16]</sup>. 다파장 빔결합 방식에서는 회절격자와 같은 회절 소자를 이용하여 서로 다른 파장의 빔들을 하나의 빔으로 결합하는 것을 특징으로 한다. 따라서 회절 이후에도 우수한 빔 품질을 유지하기 위해서는 수십 GHz의 선폭을 가진 협대역 편광유지 광섬유 레이저가 필요하다.

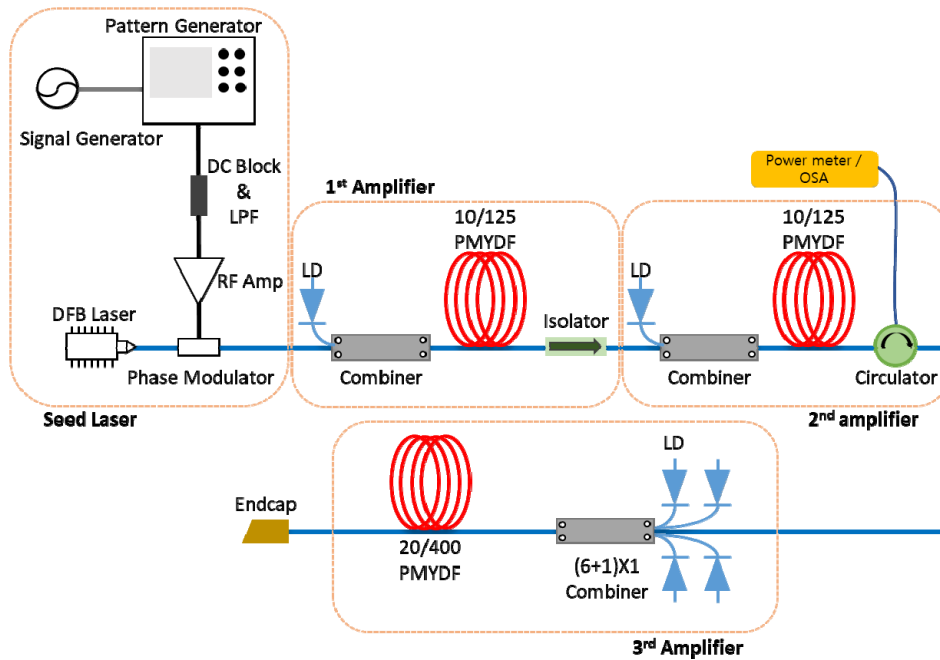
하지만 협대역 편광유지 광섬유 레이저의 경우에는 주로 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering, SBS)과 모드 불안정 현상(mode instability, MI)이 레이저의 출력 증대와 더불어 안정성 확보를 어렵게 만든다. SBS를 억제하기 위해서는 넓은 시드 선폭 적용, 광섬유 코어 사이즈 증대, 장력 분배 및 온도 구배 등의 방법을 이용하여야 한다<sup>[17-21]</sup>. MI 억제를 위해서는 텀덤 펌핑 방식, 광섬유 코일링을 통하여 고차모드의 손실을 증가시키는 방법, 작은 코어의 광섬유를 사용하는 방법 등<sup>[22-25]</sup>이 있으나, 이는 오히려 SBS를 증대시켜 출력 증가의 한계를 갖게 된다. 이 두 가지 현상을 효과적으로 동시에 억제시킬 수 있는 방법으로는 두 파장의 모드를 경쟁하게 하는 방법(two-tone amplification), 여기 빔 입사 구조 변경 방법 등 다양한 방법들<sup>[3,26-28]</sup>이 고안되며 이중 광섬유를 이용한 증폭기 구조에 대한 연구도 보고되고 있으나<sup>[29,30]</sup>, 이러한 방법들은 레이저 시스템이 복잡해져 구현에 어려움이 있다. 따라서 구현이 용이하고 동시에 주된 문제로 대두되는 비선형 현상을 완화할 수 있는 방법을 복합적으로 고려하여

출력 증대의 한계를 극복해야 한다.

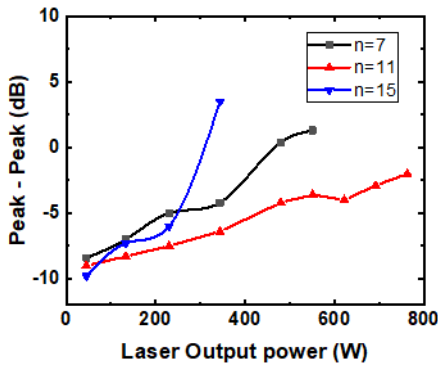
본 논문에서는 선편광된 10 GHz 선폭의 1 kW 이터븀 첨가 광섬유 레이저에 대해 보고한다. 우선 위상변조기를 이용하여 pseudo-random binary sequence (PRBS) 변조<sup>[28]</sup>한 선폭 10 GHz의 시드 레이저와 이를 증폭하기 위한 3단 증폭기 구조의 광섬유 레이저를 개발하였다. PRBS 패턴의 비트 길이에 따른 SBS 특성을 확인해가며, SBS 억제에 최적화된 PRBS 패턴의 비트 길이와 저역 통과 필터(low-pass filter, LPF) 조합의 협대역 시드 레이저를 구현하였다. 또한, 최적화 광섬유 코일링 방법이 적용된 20/400  $\mu\text{m}$  직경의 이터븀 광섬유를 주 증폭기로 사용함으로써 MI가 완화된 안정적인 1 kW급 레이저 출력을 얻을 수 있었다.

## II. 실험 방법 및 결과

그림 1은 시드 레이저와 3단 증폭기로 구성된 단일모드 편광유지 광섬유 레이저의 모식도를 나타낸 것이다. 이터븀 첨가 편광유지 광섬유를 사용한 MOPA 구조로서, 시드단, 전치 증폭단 및 주증폭단으로 구성되어 있다. 시드 레이저는 시드 광원으로 사용된 5 kHz 선폭의 분포 귀환형(distributed feedback, DFB) 레이저에 위상변조를 하여 제작하였다. 우선 0.05-12.5 GHz까지 조절 가능한 펄스 패턴 생성기를 이용하여 생성된 신호를 DC 블록(DC block, 18 GHz)을 통해 필터링하고 RF 증폭기(RF amp, 20 GHz)로 증폭하여 광 위상변조기(phase modulator, 20 GHz)에 입력하였다. 일반적으로, SBS의 안정적인 기준은 중심파장에서의 레일리 산란과 SBS 파장의 침투 세기 비율을 통하여 판단하며, 이에 대한 연구들은 활발히 진행 중이다<sup>[16,30-32]</sup>. 출력 증대를 하기에 앞서, 보다 SBS가 완화된 레이저를 구현하기 위하여 비트 길이에 따른 SBS 특성을 확인하였다. 이때 PRBS 패턴의 비트 길이는  $2^n$ -1로써, 지수  $n$ 의 변화에 따라 SBS에 어떠한 영향을 미치는지 측정하였다. 중심파장에서의 레일리 산란과 중심파장에서 약 16 GHz 전이된 파장인 SBS로 구성된 역방향의 빔을 통하여 광스펙트럼 분석기 AQ6370D (Yokogawa, Tokyo, Japan)로 측정을 진행하였다. 실험에 사용된 패턴 생성기로 가용 가능한 PRBS 패턴의 비트 지수는 한정적이며, 본 실험에 적합한 비트 길이 지수를  $n=7, 11, 15$ 로 설정하여 실험을 진행하였다. 그 결과, 그림 2와 같이,  $n=7$ 에서 지수  $n$ 이 커지도록 설정함에 따라 동일 증폭 출력에서의 레일리 반사와 SBS의 침투 세기(peak to peak)는 점차 줄어든다. 최종적으로  $n=11$ 에서 레일리 반사와 SBS의 침투 세기 비율이 최소가 되었다가 그 이상 지수  $n$ 을 높이면 다시 증가하게 된다. 즉, 비트 길이 지수  $n$ 이 증가할수록 각각의 모드가 브릴루앙 이득영역이 중첩되지 않아 분산되는 효과로 인해 SBS 완화에 도움이 된다<sup>[28]</sup>. 하지만 지수가  $n=11$ 보다 증가하면 각각의 PRBS 패



**Fig. 1.** Experimental setup of a linearly polarized Yb-doped fiber laser with a narrow linewidth of 10 GHz. The developed fiber laser consists of a DFB seed laser with a phase modulator and a three-stage amplifier. DFB Laser, distributed feedback laser; DC Block, direct current block; LPE, low-pass filter; RF Amp, radio frequency amplifier; LD, laser diode; PMYDF, polarization-maintaining ytterbium-doped fiber; OSA, optical spectral analyzer.



**Fig. 2.** Difference between Rayleigh signal and SBS signal as variations of laser output power and PRBS pattern length ( $n$ ).

턴 모드 간격이 좁아지고 브릴루앙 이득영역과 스토크스 스펙트럼(Stokes spectra)의 중첩영역이 증가됨에 따라 SBS가 증가하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 지수  $n$ 은 레일리 반사와 SBS의 첨두 세기 비율이 최소화가 되는  $n=11$ 로 설정하여 최종 증폭 실험을 진행하였다.

추가적인 SBS 억제제를 위하여 반치폭이 5.4 GHz인 LPF를 적용하여 유도 브릴루앙 이득과 중첩되는 대역을 억제<sup>[31]</sup>하였으며, 그 결과 RF 스펙트럼은 그림 3(a)와 같이 확인되었다. 광 신호의 선폭을 확인하기 위하여 파장측정기 WS-7 (High-Finesse, Tübingen, Germany)를 이용, 전체 스펙트럼의 형

상의 반치폭(FWHM)이 10 GHz로 확인[그림 3(b)]되었으며, 최종적으로 SBS 억제에 효과적인 10 GHz의 선폭을 갖는 중심파장 1064 nm의 시드 레이저를 구현하였다.

1단 증폭부는 직경 10  $\mu\text{m}$ 의 코어와 125  $\mu\text{m}$ 의 이중 클래딩 구조의 이터븀이 첨가된 편광유지 광섬유 4 m를 이득매질로 사용하였다. (2+1)  $\times$  1 여기광결합기에 연결하여 여기광원을 입사시켰으며, 이득 매질 끝단에 광도립기를 위치하여 역방향 빔을 방지하였다. 9 W급의 976 nm 고출력 파장안정화 레이저 다이오드(laser diode, LD) 1개를 사용하여 증폭한 결과, 533 mW의 출력을 얻을 수 있었다. 이어서 2단 증폭부는 (2+1)  $\times$  1 여기광결합기에 직경 10  $\mu\text{m}$ 의 코어와 125  $\mu\text{m}$ 의 이중 클래딩 구조의 이터븀이 첨가된 편광유지 광섬유 4 m를 사용하여 증폭하였다. 이 때의 여기광원은 18 W급의 976 nm 고출력 파장안정화 LD를 사용하고, 역방향 빔의 출력과 스펙트럼을 확인하기 위한 포트가 포함된 서큘레이터를 사용하였다. 더불어 18 W급의 976 nm 고출력 파장안정화 LD를 사용하여 11.4 W로 증폭하였다. 마지막으로 3단 증폭단에서는 976 nm에서의 흡수율이 1.5 dB/m인 코어 20  $\mu\text{m}$ , 클래딩 400  $\mu\text{m}$ 로 구성된 이터븀 첨가 이중 클래딩 이득 광섬유 8 m를 이득매질로 사용하였다. 이때, MI의 문턱값을 높이기 위하여 지름이 약 9-12 cm까지 나선형으로 새겨진 원형 홈을 적용하였다<sup>[25]</sup>. 더불어 320 W급의 976 nm 파장안정화 LD 4개를 (6+1)  $\times$  1 여기광결합기에 연결하여 여기 광원으로 사

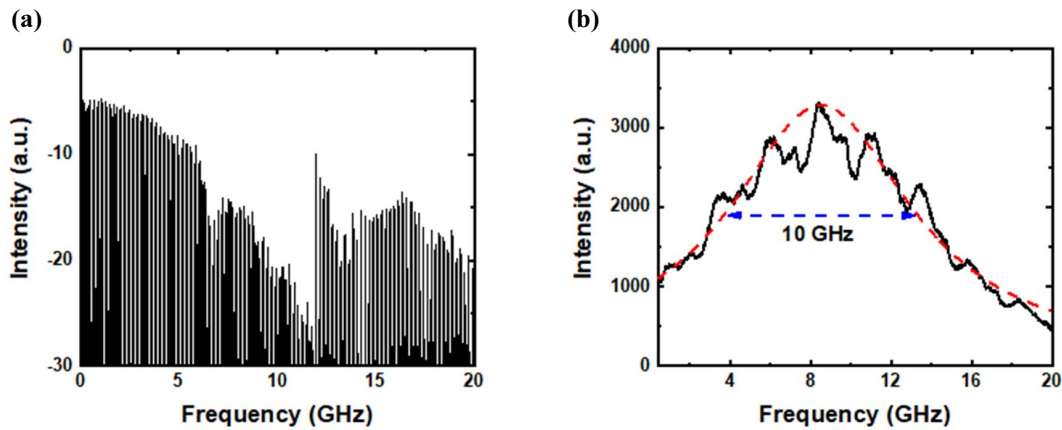


Fig. 3. Measurement results of the seed laser linewidth. (a) The power spectrum of the  $2^{11}$ -1 PRBS and (b) optical spectrum of the optimized seed with a linewidth of 10 GHz (black) and the fitted Lorentzian function (red).

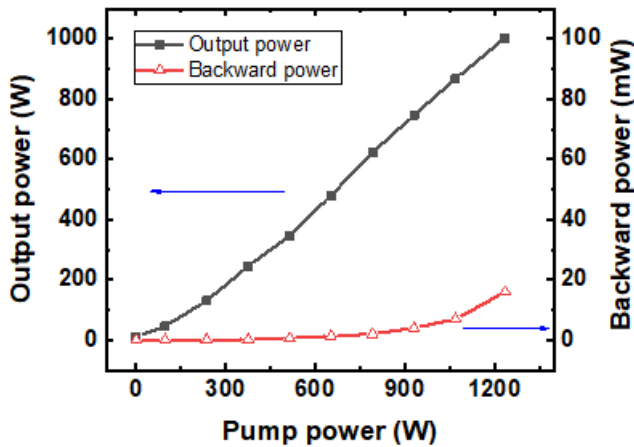


Fig. 4. Laser output power (black) and backward power (red) as a variation of incident pump power.

용하였다. 마지막으로 굴절률 차이를 통한 잔여여기광 및 고차모드 제거기능이 10 dB인 엔드캡 LLC-H-1064-655-0-1/2m (Lightcomm, Shenzhen, China)이 포함된 코어 25  $\mu\text{m}$ , 클래딩 400  $\mu\text{m}$ 의 전송광섬유  $\sim 2$  m를 적용하였다.

이와 같은 구조를 이용하여 3단 증폭을 한 결과, 그림 4에서 보는 바와 같이 입력 여기광의 출력이 1.236 kW일 때 최고 증폭 출력 1.004 kW를 얻을 수 있었으며, 이 때의 기율기 효율은 83.7%로 측정되었다. 뿐만 아니라 증폭 출력이 1.004 kW일 때, 2단 서큘레이터의 역방향 포트에서 측정된 역방향 출력은 16 mW이며, 이는 입력값의 0.002%로 SBS가 억제된 안정적인 증폭임을 확인하였다<sup>[32]</sup>. 그림 4의 출력 그래프가 선형이 아닌 이유는 파장 안정화 레이저 다이오드의 특성상 LD 출력의 60% 이상부터 파장이 고정되기 때문에 저출력 대역에서는 펄프 흡수량이 선형적이지 않기 때문이다.

그림 5(a)는 3단 증폭 시 증폭 출력별 역방향 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이는 3단 증폭시 2단 서큘레이터의 역방향 포트에서 확인되는 빔을 광스펙트럼 분석기로 측정하였으며, 레일리 산란의 중심파장과 중심파장에서 약 16 GHz 전이된 SBS의 파장의 비율을 분석하였다. 출력이 증폭됨에 따라 SBS 또한 선형적으로 증폭되어 출력  $\sim 930$  W에서 레일리 반사와 SBS의 첨두 세기 비율이 동일해지고, 최종적으로 출력 1.004 kW에서 레일리 반사와 SBS의 첨두 세기 비율은 2.36 dB [그림 5(b)]로 측정되었다. 이는 앞서 언급한 역방향 출력 결과와 같이, SBS가 효과적으로 억제된 안정적인 증폭이 가능함을 확인하였다. 그림 6은 증폭 출력별 빔품질( $M^2$ ) 및 편광 소광률(PER)을 나타낸 그래프이다.  $M^2$ 는 출력이 증가함에 따라 평균 1.115로 측정되었으며, 이는 직경 9-12 cm로 코일링함으로써  $M^2$ 가 유지되고 출력저하 없이 선형적으로 증폭되어 출력 효율이 감소되지 않는 것으로 보아 MI는 발생하지 않음을 알 수 있다<sup>[25]</sup>. PER은 출력이 증가함에 따라 평균 21.5 dB로 유지되는 것을 확인하였다.

추가적으로 레이저의 안정성을 간접적으로 확인하기 위하여 3단 증폭시 단계를 거치지 않고 최고출력까지 증폭하였을 때 레일리 파장과 SBS 파장의 첨두 세기 비율을 확인하였다. 광 출력 상승시간의 경우에는 레이저 출력단에서 샘플링한 빔을 광검출기에 입사시켜 오실로스코프 DPO3034 (Tektronix, OR, USA)로 측정하였다. 그 결과, 출력 1 kW까지 상승시간은 27.79 ms로 측정되었고, 이때의 레일리 반사와 SBS의 첨두 세기 비율은 3 dB로서 단계별 출력 증폭하였을 때와 유사한 결과로 확인되었다.

### III. 결 론

본 논문은 코어 20  $\mu\text{m}$ , 클래딩 400  $\mu\text{m}$  구조의 편광유지

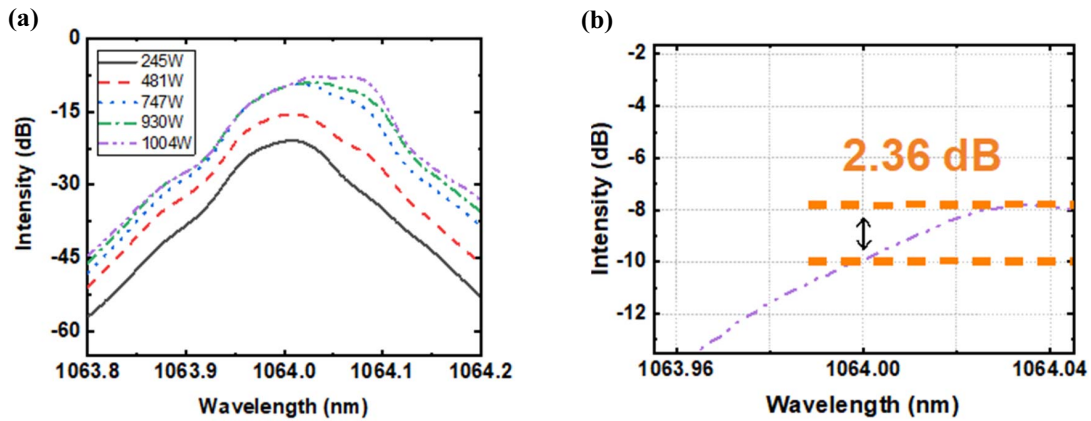


Fig. 5. Measurement results of the backward optical spectrum. (a) Backward optical spectrum for various output powers. (b) Magnified spectrum at 1 kW.

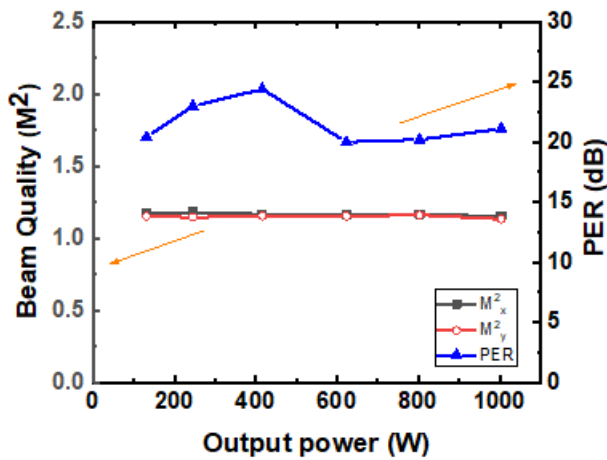


Fig. 6. Output beam quality factors,  $M^2_x$  (black, rectangle) as well as  $M^2_y$  (red, circle), and PER (blue, triangle) as a function of laser power.

이득광섬유를 적용한 1 kW급 협대역 전광섬유 레이저 시스템 구축과 이에 대한 레이저 특성에 대해 보고하였다. 효과적인 SBS 억제제를 위하여 PRBS 기반의 위상변조 방식을 적용하여 선폭 10 GHz로 최적화된 시드 레이저를 제작하였다. 3단으로 구성된 증폭기를 통해 시드 레이저를 증폭하였으며, MI의 문턱값을 높이기 위하여 주증폭단의 이득 광섬유 직경이 10.5 cm가 되도록 코일링하였다. 그 결과, 출력 1.004 kW의 레이저를 구현하였으며, 입사된 여기광 대비 기울기 효율은 83.7%이다. 더불어 증폭 출력에 따른 빔품질은 평균 1.155, 편광 소광율은 21.5 dB로 측정되었다. 출력 효율 저하가 없고, 출력이 증가함에 있어 빔품질이 유지됨을 통하여 모드 불안정성이 일어나지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 최고 출력일 때의 레일리 반사 및 SBS의 침투 세기 비율은 2.3 dB이며, 측정된 역방향 출력이 16 mW인 2단 서큘레이터 기준

0.002%로 타 그룹 레이저와 비교하더라도 낮은 수치를 알 수 있다<sup>[32]</sup>. 추가적으로 짧은 시간 안에 증폭하였을 때의 SBS 변화를 확인하기 위하여 전류를 최대값으로 인가하였을 때, 측정된 상승시간은 27.79 ms이고 레일리 반사 및 SBS의 침투 세기 비율은 3 dB로 측정되었다. 즉, 시드 최적화를 통하여 짧은 시간동안 증폭시에도 단계별로 출력 증폭했을 때와 유사하게 안정적 증폭이 가능함을 알 수 있었다. 본 논문에서 구현된 레이저는 다파장 빔결합 시 단일 레이저 모듈에 활용될 것으로 기대된다.

## References

1. D. J. Richardson, J. Nilsson, and W. A. Clarkson, "High power fiber lasers: current status and future perspectives," *J. Opt. Soc. Am. B* **27**, B63-B92 (2010).
2. C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "High-power fibre lasers," *Nat. Photonics* **7**, 861-867 (2013).
3. M. N. Zervas and C. A. Codemard, "High power fiber lasers: a review," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20**, 219-241 (2014).
4. Q. Fang, J. H. Li, W. Shi, Y. G. Qin, Y. Xu, X. J. Meng, R. A. Norwood, and N. Peyghambarian, "5 kW near-diffraction-limited and 8 kW high-brightness monolithic continuous wave fiber lasers directly pumped by laser diodes," *IEEE Photonics J.* **9**, 1506107 (2017).
5. 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).
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. 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).
  8. B. Shiner, “The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market,” in *CLEO: Applications and Technology* (Optical Society of America, 2013), paper AF2J.1.
  9. T. Y. Fan, “Laser beam combining for high-power, high-radiance sources,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11**, 567–577 (2005).
  10. S. J. Augst, J. K. Ranka, T. Y. Fan, and A. Sanchez, “Beam combining of ytterbium fiber amplifiers,” *J. Opt. Soc. Am. B* **24**, 1707–1715 (2007).
  11. C. C. Cook and T. Y. Fan, “Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity,” *Advanced Solid State Lasers* (Optical Society of America, 1999), paper PD5.
  12. V. Khitrov, K. Farley, R. Leveille, J. Galipeau, I. Majid, S. Christensen, B. Samson, and K. Tankala, “kW level narrow linewidth Yb fiber amplifiers for beam combining,” *Proc. SPIE* **7686**, 76860A (2010).
  13. C. Wirth, O. Schmidt, I. Tsybin, T. Schreiber, R. Eberhardt, J. Limpert, A. Tünnermann, K. Ludewigt, M. Gowin, E. ten Have, and M. Jung, “High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW,” *Opt. Lett.* **36**, 3118–3120 (2011).
  14. 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).
  15. Y. Kwon, K. Park, D. Lee, H. Chang, S. Lee, L. A. Vazquez-Zuniga, Y. S. Lee, D. H. Kim, H. T. Kim, and Y. Jeong, “Current status and prospects of high-power fiber laser technology,” *Korean J. Opt. Photon.* **27**, 1–17 (2016).
  16. T. J. Wagner, “Fiber laser beam combining and power scaling progress: air force research laboratory laser division,” *Proc. SPIE* **8237**, 823718 (2012).
  17. J. D. Hansryd, F. Dross, M. Westlund, P. A. Andrekson, and S. N. Knudsen, “Increase of the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution,” *J. Light. Tech.* **19**, 1691–1697 (2001).
  18. J. M. C. Boggio, J. D. Marconi, and H. L. Fragnito, “Experimental and numerical investigation of the SBS-threshold increase in an optical fiber by applying strain distributions,” *J. Light. Technol.* **23**, 3808–3814 (2005).
  19. Y. Liu, Z. Lv, Y. Dong, and Q. Li, “Research on stimulated Brillouin scattering suppression based on multifrequency phase modulation,” *Chin. Opt. Lett.* **7**, 29–31 (2009).
  20. S. Jeong, K. Kim, S. Lee, S. Hwang, H. Yang, B. Moon, Y. M. Jhon, M. K. Park, and J. H. Lee, “Characteristics of stimulated Brillouin scattering suppression in high-power fiber lasers using temperature gradients,” *Korean J. Opt. Photon.* **30**, 167–173 (2019).
  21. V. Balaswamy, R. Prakash, V. Choudhury, S. Aparanji, B. S. Vikram, and V. R. Supradeepa, “Experimental analysis of stimulated Brillouin enhancement in high power, line-broadened, narrow-linewidth fiber amplifiers due to spectral overlap between the Brillouin gain spectrum and the signal back-scatter from the fiber termination,” *Proc. SPIE* **10902**, 109021G (2019).
  22. B. Ward, C. Robin, and I. Dajani, “Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers,” *Opt. Express* **20**, 11407–11422 (2012).
  23. R. Tao, P. Ma, X. Wang, P. Zhou, and Z. Liu, “Study of wavelength dependence of mode instability based on a semi-analytical model,” *IEEE J. Quantum Electron.* **51**, 1600106 (2015).
  24. M. N. Zervas, “Transverse mode instability analysis in fiber amplifiers,” *Proc. SPIE* **10083**, 100830M (2017).
  25. R. Su, R. Tao, X. Wang, H. Zhang, P. Ma, P. Zhou, and X. Xu, “2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression,” *Laser Phys. Lett.* **14**, 085102 (2017).
  26. I. Dajani, C. Zeringue, and T. Shay, “Investigation of nonlinear effects in multitone-driven narrow linewidth high-power amplifiers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15**, 406–414 (2009).
  27. I. Dajani, C. Zeringue, C. Lu, C. Vergien, L. Henry, and C. Robin, “Stimulated Brillouin scattering suppression through laser gain competition: scalability to high power,” *Opt. Lett.* **35**, 3114–3116 (2010).
  28. A. Flores, C. Robin, A. Lanari, and I. Dajani, “Pseudo-random binary sequence phase modulation for narrow linewidth, kilowatt, monolithic fiber amplifiers,” *Opt. Express* **22**, 17735–17744 (2014).
  29. E. C. Honea, M. P. Savage-Leuchs, S. M. Courtney, K. S. Brar, J. D. Henrie, and C. D. Dilley, “Fiber amplifier system for suppression on modal instabilities and method,” *US Patent US9214781B2* (2015).
  30. S. Jeong, K. Kim, T. Kim, S. Lee, H. Yang, J. Lee, K. H. Lee, J. H. Lee, and M. 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).
  31. M. Liu, Y. Yang, H. Shen, J. Zhang, X. Zou, H. Wang, L. Yuan, Y. You, G. Bai, B. He, and J. Zhou, “1.27 kW, 2.2 GHz pseudo-random binary sequence phase modulated fiber amplifier with Brillouin gain-spectrum overlap,” *Sci. Rep.* **10**, 629 (2020).
  32. N. Platonov, R. Yagodkin, J. De La Cruz, A. Yusim, and V. Gapontsev, “Up to 2.5-kW on non-PM fiber and 2.0-kW linear polarized on PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifiers in all-fiber format,” *Proc. SPIE* **10512**, 105120E (2018).