

## High-beam-quality 2-kW-class Spectrally Combined Laser Using Narrow-linewidth Ytterbium-doped Polarization-maintaining Fiber Amplifiers

Hwanseong Jeong<sup>†</sup>, Kwang Hyun Lee, Junsu Lee, Dong-Joon Kim, Jung Hwan Lee, and Minsik Jo

Ground Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, Daejeon 34186, Korea

(Received July 7, 2020; Revised August 18, 2020; Accepted August 19, 2020)

In this paper, we have experimentally demonstrated a 2-kW-class spectrally-beam-combined laser with high beam quality, using narrow-linewidth ytterbium-doped polarization-maintaining fiber amplifiers. Five fiber amplifiers with different center wavelengths were implemented for the spectrally-beam-combined laser. The center wavelengths of the five amplifiers were 1062, 1063, 1064, 1065, and 1066 nm, respectively. A phase-modulated laser diode was used as a seed source for each amplifier. The seed sources were modulated by filtered pseudorandom-bit-sequence (PRBS) signals 5 GHz in linewidth. The polarization-maintaining large-mode-area fiber with a core size of 30  $\mu\text{m}$  was used as a delivery fiber to mitigate the stimulated Brillouin scattering (SBS) effect. The laser beams from five amplifiers were spectrally combined by a multilayer dielectric diffraction grating. The maximum output power and beam quality  $M^2$  of the combined laser were measured to be 2.3 kW and 1.74, respectively.

Keywords: Fiber lasers, Fiber amplifiers

OCIS codes: (060.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

### 협대역 이터븀 첨가 편광유지 광섬유 증폭기를 이용한 고품질 2 kW급 파장제어 빔 결합 레이저

정환성<sup>†</sup> · 이광현 · 이준수 · 김동준 · 이정환 · 조민식

국방과학연구소 지상기술연구원  
Ⓣ 34186 대전광역시 유성우체국 사서함 35호

(2020년 7월 7일 받음, 2020년 8월 18일 수정본 받음, 2020년 8월 19일 게재 확정)

본 연구에서는 편광 유지 광섬유 기반의 고회력 이터븀 첨가 광섬유 증폭기를 이용하여 고품질의 2 kW급 출력을 갖는 파장제어 빔 결합 레이저를 구현하였다. 파장제어 빔 결합을 위하여 광섬유 증폭기의 발진 파장은 각각 1062 nm, 1063 nm, 1064 nm, 1065 nm, 1066 nm로서 서로 다른 값을 갖는다. 협대역 광섬유 레이저 증폭 시 발생하는 유도 브릴루앙 산란 비선형 효과를 완화하기 위해 시드 광원은 유사이진난수 신호(pseudo-random bit sequence, PRBS)를 이용하여 위상 변조된 5 GHz의 협대역 선폭을 갖도록 하였으며 전송광섬유는 30  $\mu\text{m}$  코어 크기를 가지는 대면적 편광 유지 광섬유를 이용하였다. 파장제어 빔 결합으로 얻은 레이저의 최대 출력은 2.3 kW이며 빔 품질( $M^2$ )은 1.74이었다.

Keywords: 광섬유 레이저, 광섬유 증폭기

OCIS codes: (060.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

#### I. 서 론

최근 들어 고회력 광섬유 레이저에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 그 결과로 주 공진기 파워 증폭기(master oscillator power amplifier, MOPA) 타입의 수 kW 급 광섬유 레이저들이 보고되고 있다<sup>1-3)</sup>. 고회력 광섬유 레이저 구성

시 모든 부품이 광섬유로 이루어진 광섬유 레이저는 높은 빔 품질 특성 및 우수한 출력 안정성을 가지고 있다. 이러한 특성을 이용하여 광섬유 레이저는 기초과학, 재료 가공 및 국방 등 많은 분야에서 응용되고 있으며 응용 분야가 확대됨에 따라 더 높은 레이저 출력에 대한 요구가 증가하고 있다<sup>4-6)</sup>. 이에 수십 kW 급 이상의 고회력 고품질 광섬유 레이저 출력

<sup>†</sup>E-mail: [hs\\_jeong@add.re.kr](mailto:hs_jeong@add.re.kr), ORCID: 0000-0002-3385-5297

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

은 단일 레이저로 확보하는데 한계가 있으며, 다수의 레이저 채널을 결합하여 고출력을 달성하는 빔 결합 기술이 요구된다. 이를 위한 대표적 빔 결합 기술로 회절격자 기반의 파장 제어 빔 결합 방식(spectral beam combining, SBC)과 각 레이저 채널의 위상을 제어하는 위상제어 빔 결합 방식(coherent beam combining, CBC)이 제안되었다<sup>7-10)</sup>. 파장제어 빔 결합 방식은 좁은 선폭, 높은 빔 품질과 선편광도를 가지는 발진 파장이 다른 다수의 레이저 채널들을 결합하는 기술이다. 또한, 빔 결합장치 조립을 위해 적절한 길이의 전송 광섬유가 필요하다. 파장제어 빔 결합의 우수한 출력 안정도 및 높은 빔 결합 효율을 확보하기 위해서는 각 레이저 채널의 출력 특성이 안정적으로 유지되어야 한다.

협대역 고품질 광섬유 레이저의 출력 증가를 제한하는 주요인으로 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering, SBS)과 모드 불안정성(mode instability, MI)이 있다<sup>11,12)</sup>. SBS 효과는 광원의 세기 및 선폭, 광섬유 구조 및 길이와 관계되어 있다. 광원의 진행 방향과 반대 방향으로 진행되는 SBS 신호는 광섬유 레이저의 소손과 직접적으로 관여되어 있어 협대역 고출력 광섬유 레이저 제작에 있어서 가능한 한 저감시켜야 한다. SBS 효과를 저감하기 위해 위상변조기를 이용한 시드 광원의 선폭을 증가시키는 연구가 진행되었다. 그중 유사이진난수(pseudo-random bit sequence, PRBS)를 이용한 선폭 변조 방식이 SBS 효과 완화에 효과적으로 알려져 있으며 PRBS 신호에 저역통과 필터(low-pass filter)를 이용할 경우 SBS 효과를 더욱 완화시킬 수 있다는 것이 보고되었다<sup>13)</sup>. 광섬유 레이저 출력 제한의 또 다른 요인으로는 모드 불안정성이 있다<sup>12)</sup>. 광섬유 증폭기에서 MI 발생 시 출력의 불안정성이 높아지며 레이저의 출력 저하가 지속적으로 발생한다. MI 효과 문턱 값은 입력 신호 및 펌프 광원의 파장, 코어 크기, 개구수(numerical aperture, NA), 신호광 진행 방향 대비 펌프 광원의 진행 방향 및 광섬유 이득매질의 코일링 직경과 관계되어 있다<sup>14,15)</sup>. MI 효과를 억제하기 위해 광섬유 이득매질 코일링에 의한 고차모드 손실을 이용한 방법, 역방향 또는 양방향 펌핑을 이용하는 방법 등이 있다<sup>15)</sup>. 안정적으로 동작하는 파장제어 빔 결합을 구현하기 위해서는 협대역 광섬유 레이저에서 발생하는 두 비선형 현상을 효과적으로 억제해야 한다.

본 논문에서는 선편광 협대역 광섬유 증폭기를 이용한 파장제어 빔 결합을 구현하였다. 파장제어 빔 결합을 위해 중심 파장이 다른 5채널의 광섬유 증폭기를 제작하였다. 각 레이저의 출력은 466 W 이상이며 빔 품질은 1.15 이하이다. 또한 편광소광율(polarization extinction ratio, PER)은 16.6 dB 이상이며 각 채널의 출력 안정도는 0.5% 이하이다. 협대역 광섬유 레이저의 비선형 특성을 저감하기 위해 대역폭 필터가 적용된 PRBS 위상변조 시드 광원 및 코어 크기가 30 μm인 대면적 편광 유지 전송광섬유가 적용되었으며 광섬유 레이저는 안정적으로 동작하였다. 제작된 협대역 광섬유 레이저 5채널을 파장제어 빔 결합하여 얻은 결합 빔의 최대 출력은 2.3 kW이며 결합 빔의 빔 품질은 1.74이다.

## II. 고출력 협대역 광섬유 증폭기

그림 1은 협대역 고출력 광섬유 레이저 구조를 보여주고 있다. 시드 광원으로 1 μm 대역에서 동작하는 DFB-LD (distributed feedback laser diode)를 사용하였으며 선폭 변조를 위해 위상 변조기 및 PRBS 신호 발생기를 사용하였다. SBS 효과를 추가적으로 저감하기 위해 PRBS 신호 인가 시 저역통과 필터를 적용하였다. 각 시드 광원의 선폭은 5 GHz 이하로 구성되어 있으며 시드 광원의 중심 파장의 조절 가능한 범위는 1062-1066 nm이다. 전치 증폭단은 코어/클래드 직경 10/125 μm YDF를 사용하여 단일모드 증폭이 가능한 2단 구조로 구성되어 있으며 펌프 광원으로 976 nm 파장의 9 W 펌프 LD 1개를 1단에서, 27 W 펌프 LD 2개를 2단에서 사용하였다. 파워 증폭단에서는 코어/클래드 직경 25/400 μm YDF, (6 + 1) × 1 펌프-신호광 결합기와 976 nm의 중심 파장을 가지는 100 W 펌프 LD 6개를 이용하였다. 코일링에 의한 고차모드 손실을 이용하여 MI 현상 억제 및 고품질의 단일모드를 얻기 위해 광기구 형태 및 직경을 최적화하였다. 코일링 광기구는 나선형 그루브(groove)가 있는 평판으로서 그루브의 외경은 110 mm이고, 내경은 90 mm이며 코일링 기구부는 수냉식 냉각방식이 적용되었다. 잔존 펌프 광과 광섬유 클래드에 존재하는 광을 제거하기 위해 클래드 광 제거기(cladding light stripper, CLS)를 적용하였다. 코어 크기 증가에 따른 비선형 현상 저감 효과를 활용하기 위해 코어/클래드 직경이 30/400 μm인 전송광섬유를 적용하였으며 4.5 m 길이에 대해서도 비선형 효과는 충분히 억제되었다.

그림 2는 협대역 광섬유 레이저 5채널의 출력 및 역반사 출력을 보여주고 있다. 레이저 채널의 최대 출력은 각각 499 W, 489 W, 473 W, 491 W, 466 W이며 기울기 효율은 79-85%이다. 레이저 채널 별로 최대 출력 및 기울기 효율의 차이가 발생하는 원인은 각 레이저에 사용되는 광 부품의 손실 차이와 광섬유 용착 손실에 따른 것이다. 역반사의 출력은 40 mW 이하로 측정되었으며 이 값을 레이저 출력 값과 비교하였을 때는 0.007% 이하의 값을 가지고 있다. 그림 3은 각 광섬유 증폭기에서 발생한 역반사 출력의 스펙트럼 특성을 보여주고 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 SBS 출력은 레일리 산란 대비 낮은 값을 가지고 있으며 이는 SBS 현상이 효과적으로 억제되고 있음을 나타내고 있다. 또한, 각 레이저 채널에서 인가된 펌프 광 출력 증가에 따라 레이저 출력이 선형적으로 증가하였으며 MI 현상에 의한 레이저 출력

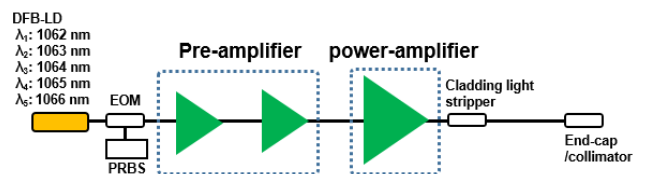


Fig. 1. Configuration of narrow-linewidth ytterbium-doped polarization-maintaining fiber amplifiers.

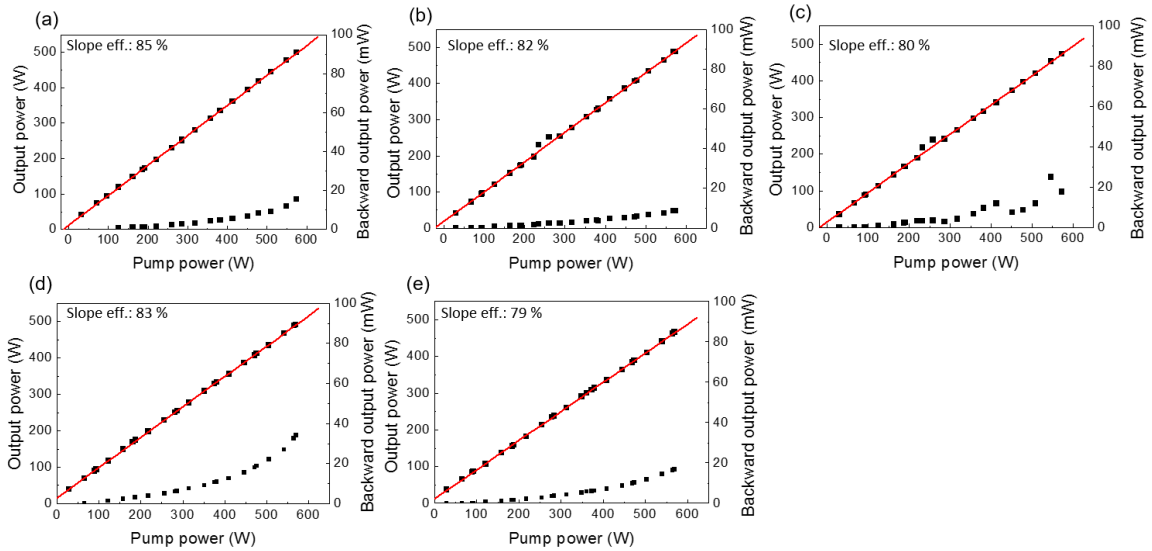


Fig. 2. Measured output power and backward output power of the five fiber amplifiers for SBC with center wavelength of (a) 1062 nm, (b) 1063 nm, (c) 1064 nm, (d) 1065 nm, and (e) 1066 nm.

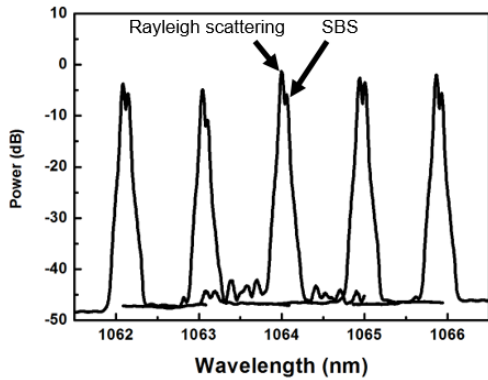


Fig. 3. Measured optical spectra of the backward propagating beams for five channels at the maximum output power.

및 기울기 효율 감소 현상은 나타나지 않았다<sup>[16]</sup>. 이는 파워 증폭단 YDF 코일링에 의해 고차모드가 제거되어 MI 현상이 억제되었음을 나타낸다. 레이저 최대 출력은 펌프 출력 한계로 인하여 제한되었지만 높은 출력의 펌프 광원을 이용할 경우 현재 레이저 구조에서도 kW 수준의 레이저 발전이 가능할 것으로 예상된다.

모든 레이저에서 PER은 16.6 dB 이상의 높은 선 편광 특성을 보이고 있으며 한 예를 나타낸 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 빔 품질은 모두 1.15 이하로서 회절한계 빔을 나타내고 있고 MI 효과에 의한 빔패턴 왜곡 현상도 관측되지 않아 단일모드 빔이 안정적으로 발전되는 것을 알 수 있었다.

### III. 고출력 파장제어 빔 결합 레이저

II장에서 설명한 협대역 광섬유 레이저를 이용하여 파장제어 빔 결합을 구현하였다. 그림 5는 파장제어 빔 결합 레이저 구성도이다. 파장제어 빔 결합 레이저는 협대역 광섬유 레이저 5채널, 광섬유 어레이, 전송거울, 단일 회절격자로 구성되어 있으며 파장제어 빔 결합 레이저의 구조는 기존 보고된 일반적인 구조로 구현되었다<sup>[17,18]</sup>. 광섬유 어레이는 전송 광섬유와 동일한 코어/클래드 직경 30  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$  광섬유를 등간격으로 배치한 구조이다. 전송거울은 중심 파장 및 공간적 위치가 다른 5개의 빔을 각각 다른 입사각으로 회절격자의 한 점에 입사시키는 역할을 하며 이때 전송거울에서 수차가 발생하게 된다. 이는 결합 빔의 빔 품질을 저하시키는 요인 중 하나이다. 협대역 광섬유 레이저 채널의 전송광섬유와 광섬유 어레이의 전송광섬유를 연결 시에는 대구경 편광 유지 광섬유의 물리적 특성에 의해 광섬유 뒤틀림 현상을 회피할 수 있도록 전송광섬유의 적절한 길이와 융착 조건을 확보해야 한다<sup>[19]</sup>. 광섬유 뒤틀림 현상이 발생할 경우 광섬유에

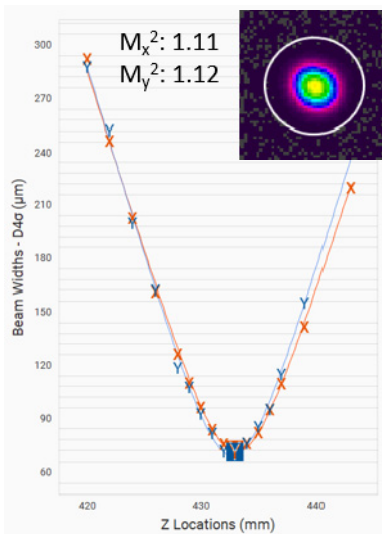


Fig. 4. Measured beam quality ( $M^2$ ) of the second channel at the center wavelength of 1063 nm.

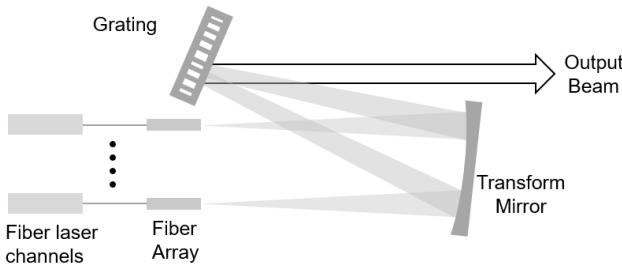


Fig. 5. Configuration for spectral beam combining of five fiber lasers.

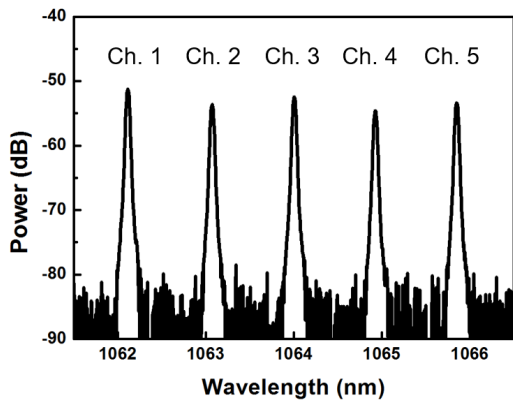


Fig. 6. Measured optical spectrum of the spectrally combined laser beam.

도파되는 공간모드의 왜곡을 초래하게 되며 이는 빔 결합 시 빔 결합 효율 저하 및 구성품 손상을 초래하는 원인이 된다. 5채널 결합된 빔의 최대 출력은 2.3 kW이며 결합 빔의 스펙트럼은 그림 6에서 나타난 바와 같이 5채널 레이저빔 파장이 결합되어 있음을 알 수 있다.

그림 7은 파장제어 빔 결합장치를 통과한 각 광섬유 증폭기 채널(그림 7(a)-7(e)) 및 결합 빔의 공간분포(그림 7(f))를 보여주고 있다. 각 빔의 공간모드 형상이 원형이 아닌 타원형의 형태를 갖는 이유는 각 빔을 Littrow 조건으로 회절격자에 입사시키기 때문에 회절격자 입사빔과 회절빔을 분리하기 위해 회절격자를 약간 기울이는 광학적 구조 때문이다. 파장제어 빔 결합에 의해 추가적인 형상 왜곡 없이 안정적으로 빔 결합이 구현된 것을 보여주고 있다. 회절 격자 이후 각 광섬유 레이저 채널 빔 품질은 1.72 이하이며 2.3 kW의 출력을 갖는 결합 빔의 빔 품질은 1.74 ( $M_x^2 = 1.80$ ,  $M_y^2 = 1.69$ )이다. 파장제어 빔 결합 레이저의 빔 품질은 입사빔의 선폭 및 빔 직경, 회절격자 밀도와 관련되어 있으며 회절격자 특성에 의해  $M_x^2$ 와  $M_y^2$  값의 차이가 발생한다. 회절 축 방향의  $M_x^2$ 는 회절에 의해 입사빔의  $M_x^2$  대비 저하되며 회절되지 않는  $M_y^2$ 는 입사빔의  $M_y^2$ 와 동일하게 유지된다<sup>[20]</sup>. 실제 결합 빔의 품질은 회절뿐만 아니라 빔 결합 장치 광 부품의 제작 공차, 광 정렬 오차, 전송거울의 수차 등에 의해 영향을 받기 때문에 빔 품질을 개선하기 위해서는 이와 같은 제작 요인들을 최소화하기 위한 노력이 필요하다. 또한, 입

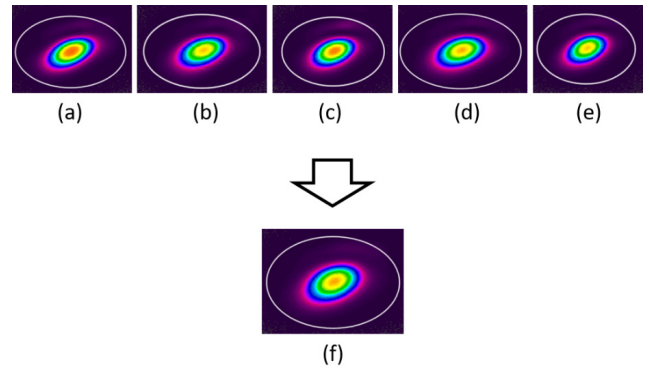


Fig. 7. Measured beam profiles of (a) Channel 1, (b) Channel 2, (c) Channel 3, (d) Channel 4, (e) Channel 5, and (f) combined beam.

사빔의 선폭이 감소되면 회절에 의한 빔 발산이 저감되어 빔 품질은 개선되나 SBS 효과로 레이저 채널의 출력이 제한되는 단점이 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 안정적으로 동작하며 회절 한계 빔 품질 특성을 갖는 협대역 고출력 광섬유 레이저 기반의 파장제어 빔 결합 레이저를 구현하였다. 파장제어 빔 결합을 구현하기 위해 중심 파장이 1062 nm, 1063 nm, 1064 nm, 1065 nm, 1066 nm인 고출력 광섬유 레이저 5개 채널을 구성하고 비선형 현상을 억제하기 위하여 각 레이저 채널에서 PRBS 신호 위상변조에 의해 선폭이 확대된 시드 광원 및 코어 크기가 30  $\mu\text{m}$ 인 대구경 편광 유지 전송광섬유를 이용하였다. 제작된 광원의 빔 품질 특성은 1.15 이하로 회절 한계의 빔 품질 특성을 갖고 있으며 PER은 16 dB 이상이다. 제작된 광섬유 증폭기 채널을 이용하여 파장제어 빔 결합을 구현하였으며 결합 빔의 최대 출력은 2.3 kW, 빔 품질은 1.74로서 파장제어 빔 결합에 의해 빔 품질이 우수한 고출력 레이저를 얻을 수 있음을 확인하였다.

#### References

1. 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).
2. J. Wang, D. Yan, S. Xiong, B. Huang, and C. Li, "High power all-fiber amplifier with different seed power injection," *Opt. Express* **24**, 14463-14469 (2016).
3. 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).

4. C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "High-power fiber lasers," *Nat. Photon.* **7**, 861-867 (2013).
5. M. N. Zervas and C. A. Codemard, "High power fiber lasers: a review," *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.* **20**, 0904123 (2014).
6. P. Sprangle, B. Hafizi, A. Ting, and R. Fischer, "High-power lasers for directed-energy applications," *Appl. Opt.* **54**, F201-F209 (2015).
7. A. Flores, I. Dajani, R. H. Holten, T. Ehrenreich, and B. T. Anderson, "Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers," *Opt. Eng.* **55**, 096101 (2016).
8. H. Meng, T. Sun, H. Tan, J. Yu, W. Du, F. Tian, J. Li, S. Gao, X. Wang, and D. Wu, "High-brightness spectral beam combining of diode laser array stack in an external cavity," *Opt. Express* **23**, 21819-21824 (2015).
9. T. Y. Fan, "Laser beam combining for high-power, high-radiance sources," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11**, 567-577 (2005).
10. E. J. Bochove, "Theory of spectral beam combining of fiber lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **38**, 432-445 (2002).
11. G. P. Agrawal, "Stimulated Brillouin scattering," in *Nonlinear Fiber Optics*, 4th ed. (Elsevier, USA, 2007), pp. 329-367.
12. K. R. Hansen, T. T. Alkeskjold, J. Broeng, and J. Lægsgaard, "Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers," *Opt. Express* **21**, 1944-1971 (2013).
13. B. M. Anderson, A. Flores, and I. Dajani, "Filtered pseudo random modulated fiber amplifier with enhanced coherence and nonlinear suppression," *Opt. Express* **25**, 17671-17682 (2017).
14. H.-J. Otto, N. Modsching, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "Impact of photodarkening on the mode instability threshold," *Opt. Express* **23**, 15265-15277 (2015).
15. R. Tao, X. Wang, and P. Zhou, "Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.* **24**, 0903319 (2018).
16. Y. H. Park, Y. S. Youn, M. W. Jung, C. Jun, B.-A. Yu, and W. Shin, "Polarization-maintaining single-mode 400-W Yb-doped fiber laser with 2.5 GHz linewidth from a 3-stage MOPA system," *Korean J. Opt. Photon.* **29**, 159-165 (2018).
17. P. Madasamy, T. Loftus, A. Thomas, P. Jones, and E. Honea, "Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems," *Proc. SPIE* **6952**, 695207 (2008).
18. 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).
19. X. Wang and Z. Wang "Self-aligning polarization strategy for making side polished polarization maintaining fiber devices," *Opt. Express* **18**, 49-55 (2010).
20. T. H. Loftus, A. M. Thomas, P. R. Hoffman, M. Norsen, R. Royse, A. Liu, and E. C. Honea, "Spectrally beam-combined fiber lasers for High-average-power applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13**, 487-497 (2007).