

高功率超连续光谱的光纤产生技术

贾彩萍^{1,2}, 王春灿^{1,2*}

(1. 北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 具有高功率、宽频谱的超连续光谱(SC)光源被广泛应用于光谱学及生物医学等领域。介绍了几种基于无源光纤和有源光纤产生高功率 SC 的产生方案, 从光纤材料、带宽和输出功率等方面对各个方案进行了总结对比, 并指出通过合理选择光纤类型或结构, 有利于提升 SC 带宽及输出功率。

关键词: 高功率; 超连续光谱; 无源光纤; 有源光纤

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)10-0042-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High power supercontinuum with fiber generation technology

JIA Caiping^{1,2}, WANG Chuncan^{1,2*}

(1. Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Supercontinuum(SC) light sources with high powers and broad spectra are widely employed in the fields of spectroscopy and biomedicine. Several schemes for high power supercontinuum generation based on the passive and active fibers are introduced, various schemes are compared in the aspects of fiber materials, bandwidth, and output power. In this paper, it is pointed out that the reasonable selection of fiber type or structure is conducive to the improvement of SC bandwidth and output power.

Key words: high power; supercontinuum; passive fiber; active fiber

0 引言

光脉冲通过非线性介质时频谱较窄的信号光在光纤色散及各种非线性效应的综合作用下, 使输出光波频谱获得极大展宽, 从而形成超连续光谱(SC)。光纤输出的 SC 因为具有光束质量高、散热性能好、易于维护和结构紧凑等优势, 在光学相干层析^[1]、光谱学^[2]和生物医学^[3]等诸多领域具有重要的研究价值, 同时不同应用领域的发展也对 SC 的输出功率和光谱覆盖范围提出了更高的要求^[4-5]。因此, 进一步提升 SC 的输出功率具有重要意义。从研究现状看, 高功率 SC 光纤光源的

平均功率已经可以达到瓦量级。目前, 高功率 SC 的产生方法^[6]从光纤类型区分主要分为两大类: 无源光纤法和有源光纤法。本文主要对这 2 种方法进行介绍和总结。

1 高功率 SC 的产生方案

高功率 SC 可以基于无源光纤和有源光纤 2 种方法获得。如图 1(a)所示, 无源光纤法大致可分脉冲波和连续波(CW) 2 种泵浦源抽运高非线性光纤获得高功率 SC。基于有源光纤产生 SC 的方法是将功率较低的种子脉冲光直接耦合到有源光纤中, 同时实现脉冲光谱展宽和功率放大, 基本流程如图 1(b)所示。

1.1 基于高非线性无源光纤产生 SC

1.1.1 连续光泵浦光纤产生高功率 SC

CW 产生 SC 的关键是泵浦光波长在光纤中处于低反常色散状态, 即接近光纤的零色散波长(ZDW)时, 调制不稳定性(MI)现象导致较长波长的 MI 边带经历受激喇曼散射放大, 形成喇曼斯托克斯波, 这种效应与色散、受激喇曼散射及其它非线性效应的结合实

收稿日期: 2020-03-06。

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61575018)资助。

作者简介: 贾彩萍(1994—), 女, 硕士生, 山西吕梁人, 现就读于北京交通大学电子信息工程学院通信与信息系统专业, 主要从事全光交换、特种光纤及器件的研究。在校期间, 多次获得奖学金和荣誉, 包括 2017 年度、2018 年度 2 次获得北京交通大学一等学业奖学金, 2018 年度获得北京交通大学“优秀研究生干部”称号。

*通信作者: 王春灿(E-mail: chewang@bjtu.edu.cn)。



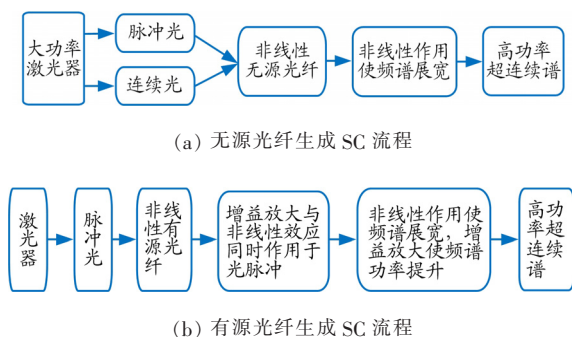


图 1 光纤产生高功率 SC 方案流程

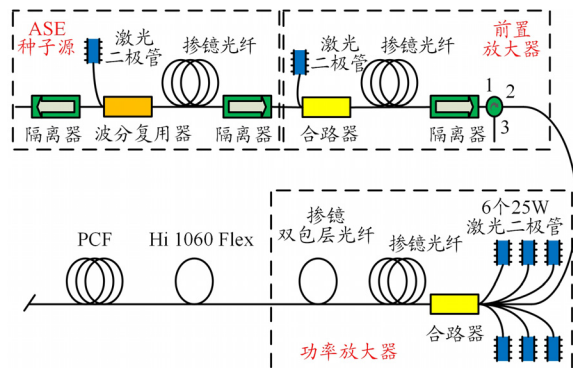


图 2 CW 泵浦 PCF 产生 SC 的原理图

现光谱展宽^[7]。

2008 年, J.C.Traves 等人^[8]利用输出功率为 432 W、中心波长为 1070 nm 和谱宽为 3.6 nm 的 CW 光纤激光器泵浦 ZDW 为 840 nm、非线性系数为 $44 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ 和长为 20 m 的光子晶体光纤 (PCF), 通过桥接光纤将 CW 光纤激光器与 PCF 进行耦合以降低耦合损耗, 总耦合效率在 30%~50% 之间, 通过改变 PCF 的类型, 获得输出功率为 50 W、光谱范围覆盖 1060~2200 nm 的 SC。2010 年, Chunyu Guo 等人^[9]利用输出功率为 20 W、中心波长为 1071.5 nm 和线宽为 0.5 nm 的掺铒激光器产生的 CW 泵浦长为 200 m、ZDW 为 1030 nm 和非线性系数为 $11 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ 的 PCF; PCF 连接长为 100 m、ZDW 为 1840 nm 的高非线性光纤 (HNLF), 其在 1550 nm 处的色散为 $-5 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 非线性系数为 $10 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, 获得最大输出功率为 8 W、10 dB 带宽为 420 nm (1055~1475 nm) 的 SC。2011 年, C Larsen 等人^[10]通过增益开关获得平均功率为 30 W、持续时间为 200 ns 和重复频率为 200 kHz 的准连续光, 将其耦合到 ZDW 为 1040 nm、泵浦波长为 915 nm 处的非线性参数为 $11.3 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ 、长为 100 m 的 PCF 中, 获得输出功率为 12 W、光谱范围为 500~2250 nm 的 SC。另外, C. Larsen 等人^[11]于 2013 年同样使用增益开关方法获得脉冲持续为 210 ns、平均功率为 21 W 的准 CW 泵浦源, 泵浦波长为 1064 nm, 将其耦合到 ZDW 为 1040 nm、非线性系数为 $11.3 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ 和长 100 m 的 PCF 中, 获得输出平均功率为 13.5 W 的 SC, 光谱覆盖范围为 600~2200 nm。2015 年, JIN A 等人^[12]报道了泵浦光源分别采用放大自发辐射 (ASE) 和 CW 激光源, 然后耦合到 PCF 产生 SC 的实验。CW 泵浦 PCF 产生 SC 的原理图如图 2 所示, 将单模掺铒光纤中产生的 ASE 种子光源通过两级掺铒光纤放大器获得 90.9 W 的 ASE 光源, 将其耦合到 Hi1060 Flex 桥接光纤以降低耦合损耗, PCF 的 ZDW 为 1012.5 nm, 非线性系数为 $60 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, 长为 100 m, 最终输出功率为

49.5 W、5 dB 光谱带宽为 760 nm (1062~1822 nm) 的 SC; 用工作波长为 1090 nm、功率为 122 W 的 CW 激光器泵浦相同的 PCF, 获得输出功率为 56.2 W、5 dB 光谱宽度为 605 nm (1082~1687 nm) 的 SC。实验证明以 ASE 为泵浦的 SC 具有更宽和更平滑的光谱功率。

1.1.2 脉冲光泵浦光纤产生高功率 SC

由主振荡功率放大器 (MOPA) 方法产生的高功率脉冲光被广泛应用于各种光纤结构 SC 的生成。2011 年, Hongwei Chen 等人^[13]提出了一种 MOPA 级联 PCF 获得高功率 SC 的方案, 将被动锁模光纤激光器与两级放大器结合获得重复频率为 478 MHz、脉冲宽度为 14 ps、中心波长为 1064 nm 和平均功率为 3.5 W 的种子光源, 种子光源经过由 976 nm 激光二极管泵浦的掺铒光纤放大器提升功率后, 耦合到 ZDW 为 1150 nm、长为 30 m 的 PCF, 最终获得 35.6 W、光谱覆盖范围为 600~1700 nm 的高功率 SC, 基于 MOPA 泵浦 PCF 产生 SC 的原理图如图 3 所示。2014 年, KunLiu 等人^[14]基于 MOPA 方案在 ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) 光纤产生 SC 的系统, 使用中心波长为 1963 nm 锁模光纤振荡器产生脉冲宽度约为 24 ps、重复频率为 93.6 MHz 的种子脉冲, 将种子脉冲通过两级掺铒光纤放大器产生的放大皮秒脉冲耦合到 ZDW 为 1570 nm 的单模 ZBLAN 光纤中, 获得光谱范围为 1900~3800 nm、

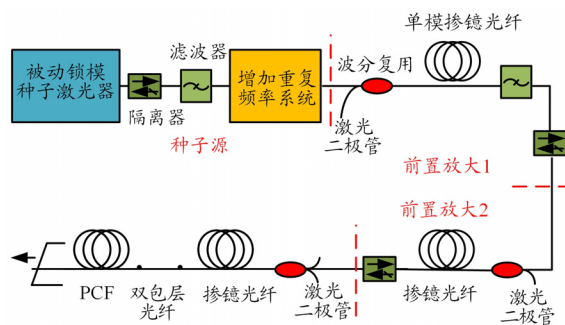


图 3 基于 MOPA 泵浦 PCF 产生 SC 的原理图

平均功率为 21.8 W 的 SC 输出。此外,2016 年,Christian Kneis 等人^[15]提出使用调 Q 锁模掺铒光纤激光器产生功率为 23.5 W、重复频率为 150 kHz 的锁模脉冲泵浦 ZBLAN 光纤产生功率为 7.8 W、光谱展宽至 4200 nm 的中红外(mid-IR)SC。2019 年,Linyong Yang 等人^[16]报道了通过激光脉冲光谱覆盖 1900~2600 nm 波段的掺铒光纤放大器泵浦长为 2 m、纤芯/包层直径为 10/125 μm 和 ZDW 为 2610 nm 的 ZBLAN 光纤,获得平均功率高达 30.0 W、光谱覆盖范围为 1900~3350 nm 的 SC。2017 年,Ning Su 等人^[17]报道了基于 MOPA 技术的全光纤皮秒脉冲宽带光纤放大器在 1150 nm 处产生输出平均功率为 60 W、重复频率为 8.47 MHz 和脉冲宽度为 221 ps 的脉冲,使用该放大器泵浦长 10 m 的七芯 PCF 获得 620~1700 nm 的 SC,其输出功率为 11.7 W。2018 年,WANG Nan 等人^[18]报道了用重复频率为 4.5 MHz、中心波长为 1035 nm 的皮秒脉冲掺铒 MOPA 泵浦 ZDW 为 1020 nm、长为 6 m 的七芯 PCF,获得频谱范围为 350~2400 nm、输出功率为 6.86 W 的 SC。

1.2 基于有源光纤产生 SC 方案

1.2.1 掺铒光纤产生高功率 SC

掺铒双包层石英光纤结构被广泛应用于 SC 的生成。2007 年,P.H.Pioger 等人^[19]提出用调 Q 激光器产生中心波长为 1064 nm、脉冲宽度和重复频率分别为 20~40 ns 和 10 kHz~1 MHz 可调的泵浦激光,耦合到纤芯直径为 7 μm 、ZDW 接近 1300 nm、非线性参数为 4.4 W^{-1}/km 和长 5 m 的双包层非线性掺铒有源光纤产生 2.5 W、光谱范围为 1000~1750 nm 的 SC,其原理图如图 4 所示。2014 年,Ja Hon Lin 等人^[20]报道了基于 MOPA 结构的单模掺铒光纤激光器产生近红外 SC 的研究。全正常色散区域工作的被动锁模掺铒光纤激光器在 342 mW 的 974 nm 激光二极管泵浦作用下,生成锁模脉冲,将其耦合到非线性参数为 19 W^{-1}/km 、长为 20 m 的单模掺铒氧化锆掺铒光纤,获得最高脉冲能量为 324.6 nJ、频谱范围是 1010~1600 nm 的 SC。2019 年,E. AGHAYARI 等人^[21]基于非线性极化旋转锁模的掺铒光纤激光器产生重复频率为 11.57 MHz、能量为

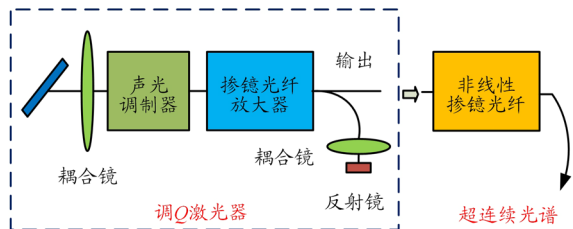


图 4 非线性双包层掺铒有源光纤产生 SC 原理图

16.5 nJ、3 dB 带宽为 42 nm 的类似噪声脉冲(NLP),通过长为 8 m、纤芯/包层直径为 7/128 μm 的双包层掺铒光纤放大器,最终获得平均功率为 7.5 W、10 dB 带宽为 1130 nm(1037~2167 nm)的高功率 SC。

另外,基于掺铒的 PCF 也被广泛用于产生 SC。2016 年,Tobias Baselt 等人^[22]提出利用纳米粉末工艺制作的掺铒 PCF 被用于光纤放大器的非线性光纤介质,非线性掺铒 PCF 产生 SC 原理图如图 5 所示。工作波长为 976 nm、功率输出最大值为 735 mW 的激光器提供泵浦光,将工作波长为 1064 nm、脉冲宽度为 2.1 ns、峰值功率为 11 kW 和重复频率为 12.5 kHz 的微片激光器提供的种子脉冲光耦合到 ZDW 为 1030 $\pm$ 3 nm 的掺铒 PCF 中,产生 SC 的频谱覆盖范围为 1100~1370 nm。由图 5 可以看出,这种方案的系统结构相对简单,光纤耦合难度较小。2017 年,Youngchul Kwon 等人^[23]将脉冲宽度为 200 fs、脉冲能量为 1 nJ 和峰值功率为 4.7 kW 的种子脉冲光耦合到工作波长为 1064 nm、非线性参数为 37 W^{-1}/m 和长为 3.6 m 的掺铒 PCF 中,输出脉冲具有约 400 nm 的 20 dB 带宽,峰值功率达到 2.1 kW。除常见的掺铒双包层及 PCF 结构外,2016 年,Yingye An 等人^[24]还提出一种基于分布式侧耦合包层泵浦(DSCCP)掺铒光纤结构,以产生高功率全光纤宽带超荧光光源(SFS)的方案,超荧光光源由掺铒光纤中的 ASE 生成,DSCCP 掺铒光纤内包层直径为 250 μm 、纤芯直径为 30 μm 、光纤长为 7.3 m,前后向 ASE 的功率共 186.3 W,带宽均大于 20 nm。

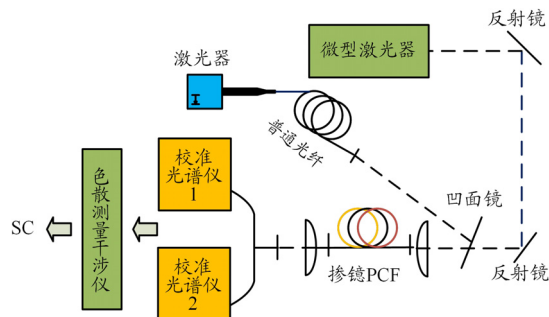


图 5 非线性掺铒 PCF 产生 SC 原理图

1.2.2 其它掺杂稀土离子光纤产生高功率 SC

2016 年,L. A. Vazquez-Zuniga 等人^[25]设计了一类由 3 种掺铅硅酸盐玻璃材料(即:肖特 SF57、LLF1 和 SF6)制成的高非线性 W 型掺铒光纤,在 1550 nm 处具有平坦的反常色散斜率,非线性系数为 790 W^{-1}/km 。锁模光纤激光器产生的脉冲宽度为 11 ps、重复频率和平均功率分别为 13.2 MHz 和 20 mW 的种子脉冲光,与

工作波长为 1480 nm、功率为 70 mW 的泵浦光耦合到长 0.94 m 的 W 型掺铒光纤中产生超过 350 nm(−30 dB 带宽)的光谱展宽。2018 年,Linyong YANG 等人^[26]采用脉冲宽度为 1.6 ns、重复频率为 70 kHz 和 10 dB 光谱覆盖 2200~3100 nm 的宽带激光器提供的种子光源,与 8.5 W 的 976 nm 多模激光二极管提供的泵浦光耦合到 ZDW 为 1610 nm、长为 7 m 和纤芯/内包层直径为 15/260 μm 的掺铒 ZBLAN 光纤放大器中,产生频谱范围为 2700~4250 nm、功率为 1.75 W 的中红外 SC。同年,Linyong Yang 等人^[27]利用工作波长为 2050 nm 的调 Q 光纤激光器产生脉冲宽度为 20 ns、重复频率为 20 kHz 和功率为 50 mW 的种子脉冲光,与工作波长为 1950 nm、最大输出功率为 4.2 W 的 CW 泵浦光耦合到 ZDW 为 1620 nm、长为 6 m 和纤芯与包层直径为 10/125 μm 的掺铒 ZBLAN 有源光纤生成光谱覆盖范围为 2030~2900 nm、功率为 248 mW 的 SC,通过级联无源 ZBLAN 光纤输出脉冲频谱可红移至 3700 nm。2020 年,Clément Romano 等人^[28]报道了基于 MOPA 技术、由直接调制 1952 nm 波长半导体种子激光源与两级掺铒光纤放大器产生的 SC 激光源,将脉冲宽度为 6 ns、重复频率为 100 kHz 种子脉冲光耦合到长为 4.8 m 的单包层掺铒光纤前置放大器和长为 4 m 的双包层掺铒后置放大器获得光谱范围 1950~2650 nm,最大输出平均功率为 1.6 W 的 SC。

2 基于光纤产生高功率 SC 方案的比较

2 种基于光纤生成高功率 SC 方案的优势和存在的问题对比情况如表 1 所示。无源光纤法、有源光纤法产生高功率 SC 方案输出的光谱宽度、功率对比情况分别如表 2、表 3 所示。

表 1 2 种基于光纤生成高功率 SC 方案的对比

产生 SC 方案		优势	存在的问题
无源 光纤 方案	脉冲波泵浦 方案	泵浦光到 SC 的转换效率较高	系统结构较复杂,脉冲光平均功率比连续泵浦光源低
	CW 泵浦方 案	泵浦光输出功率高,结构较简单 ^[4,6]	与脉冲光泵浦非线性光纤产生 SC 相比,连续泵浦光源到 SC 的转换效率相对较低;需要光纤较长;光纤连接耦合处容易因高功率损伤
有源光纤方案		结构简单紧凑,易于搭建;增益放大与非线性效应同时作用于脉冲 ^[19]	增益光纤的增益带宽对 SC 谱的生成有一定的限制作用 ^[23]

表 2 无源光纤法产生高功率 SC 方案输出的光谱宽度、功率对比情况

方案	年份	光纤类型	输出光谱宽度/nm	输出功率/W
1.1.1 节中的 方案	2008 ^[8]	PCF	1140(1060~2200)	50
	2010 ^[9]	PCF	420(1055~1475)	8
	2011 ^[10]	PCF	1750(500~2250)	12
	2013 ^[11]	PCF	1600(600~2200)	13.5
	2015 ^[12]	PCF	605(1082~1687)	56.2
1.1.2 节中的 方案	2011 ^[13]	PCF	1100(600~1700)	35.6
	2017 ^[17]	PCF	1080(620~1700)	11.7
	2018 ^[18]	PCF	2050(350~2400)	6.86
	2014 ^[14]	ZBLAN	1900(1900~3800)	21.8
	2016 ^[15]	ZBLAN	1600(2600~4200)	7.8
	2019 ^[16]	ZBLAN	1450(1900~3350)	30

表 3 有源光纤法产生高功率 SC 方案输出的光谱宽度、功率对比情况

方案	年份	光纤类型	输出光谱宽度/nm	输出功率/W
1.2.1 节中 的方案	2007 ^[19]	掺铒双包层石英光纤	750(1000~1750)	2.5
	2019 ^[21]	掺铒双包层石英光纤	1130(1037~2167)	7.5
	2014 ^[20]	GZY	590(1010~1600)	—
	2016 ^[22]	掺铒 PCF	270(1100~1370)	—
	2017 ^[23]	掺铒 PCF	400	—
	2016 ^[24]	掺铒 DSCCP	20	186.3
1.2.2 节中 的方案	2016 ^[25]	Er ³⁺ /W 型光纤	350	—
	2018 ^[26]	Er ³⁺ /ZBLAN 光纤	1550(270~4250)	1.75
	2018 ^[27]	HO ³⁺ /ZBLAN 光纤	870(2030~2900)	0.248
	2020 ^[28]	掺铒光纤	700(1950~2650)	1.6

3 结束语

本文主要介绍了基于无源和有源光纤 2 种产生高功率 SC 的方案。无源光纤法主要包括基于脉冲波和 CW 2 种泵浦光源耦合到非线性光纤产生 SC 的技术。实验结果表明: CW 泵浦比脉冲光泵浦产生 SC 的平均功率更高,系统搭建相对简单,存在问题在于较长的光纤长度会导致光纤损耗增加,并且需要较高的泵浦功率以增加输出带宽^[10]。脉冲波泵浦产生 SC 的方案中,泵浦光到 SC 的转换效率较高,可以通过改变脉冲宽度和脉冲峰值功率等参数控制 SC 的输出特性,因此与 CW 泵浦方案相比更容易控制输出光谱参数。但是,脉冲光纤激光源输出平均功率的提升受光纤放

大器中非线性效应和光纤损伤阈值的限制^[5]。另外,有源光纤法是通过设计高非线性有源光纤,使增益放大和非线性效应同时作用于有源光纤中的传输脉冲,使输出脉冲获得频谱展宽的同时功率也得到提升,但产生的 SC 在一定程度上受有源光纤增益带宽的限制作用^[19,23]。本文综合比较各项技术的优势与存在问题,希望通过合理设计光纤结构,借助有源光纤的增益与非线性效应相结合的优势,克服增益带宽对输出脉冲频谱展宽的限制作用。

参考文献:

- [1] WANG C, KIM J, JIN C T, et al. Near infrared spectroscopy in optical coherence tomography [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2012, 20 (1): 237–247.
- [2] LEVICK A P, GREENWELL C L, IRELAND J, et al. Spectral radiance source based on supercontinuum laser and wavelength tunable bandpass filter: the spectrally tunable absolute irradiance and radiance source [J]. Applied optics, 2014, 53(16): 3508–3519.
- [3] TU H, BOPPART S A. Coherent fiber supercontinuum for biophotonics [J]. Laser & photonics reviews, 2013, 7(5): 628–645.
- [4] SONG R, HOU J, WANG Y B, et al. Analysis of the scalability of single-mode near-infrared supercontinuum to high average power [J]. Journal of Optics, 2013. DOI: 10.1088/2040-8978/15/3/035203.
- [5] 侯静,陈胜平,陈子伦,等. 高功率超连续谱光源研究进展与关键技术分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013(8): 102–114.
- [6] CHEN H, CHEN S P, JIANG Z F, et al. Enhanced supercontinuum generation in nonlinear Ytterbium-doped fiber amplifier by seeding at short wavelength[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2015, 51(11): 1–7.
- [7] LAU K Y, SUHAILIN F H, ABIDIN N H Z, et al. Continuous-Wave Pumping Supercontinuum Generation in Random Distributed Feedback Laser Cavity[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 1–7.
- [8] TRAVERS J C, RULKOV A B, CUMBERLAND B A, et al. Visible supercontinuum generation in photonic crystal fibers with a 400W continuous wave fiber laser[J]. Optics Express, 2008, 16(19): 14435–14447.
- [9] GUO C, RUAN S, YAN P, et al. Flat supercontinuum generation in cascaded fibers pumped by a continuous wave laser [J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11046–11051.
- [10] LARSEN C, NOORDEGRAAF D, SKOVGAARD P M W, et al. Gain-switched CW fiber laser for improved supercontinuum generation in a PCF[J]. Optics Express, 2011, 19(16): 14883–14891.
- [11] LARSEN C, SRENSSEN S T, NOORDEGRAAF D, et al. Zero-dispersion wavelength independent quasi-CW pumped supercontinuum generation[J]. Optics Communications, 2013, 290: 170–174.
- [12] JIN A, ZHOU H, ZHOU X, et al. High-power ultraflat near-infrared supercontinuum generation pumped by a continuous amplified spontaneous emission source[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 1–9.
- [13] CHEN H, CHEN S, WANG J, et al. 35 W high power all fiber supercontinuum generation in PCF with picosecond MOPA laser[J]. Optics communications, 2011, 284(23): 5484–5487.
- [14] LIU K, LIU J, SHI H, et al. High power mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode ZBLAN fiber with up to 21.8 W average output power[J]. Optics express, 2014, 22(20): 24384–24391.
- [15] KNEIS C, DONELAN B, MANEK-HÖNNINGER I, et al. High-peak-power single-oscillator actively Q-switched mode-locked Tm³⁺-doped fiber laser and its application for high-average output power mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber[J]. Optics letters, 2016, 41(11): 2545–2548.
- [16] YANG L, LI Y, ZHANG B, et al. 30-W supercontinuum generation based on ZBLAN fiber in an all-fiber configuration[J]. Photonics Research, 2019, 7(9): 1061–1065.
- [17] SU N, LI P X, XIAO K, et al. Supercontinuum generation in seven-core photonic crystal fiber pumped by a broadband picosecond pulsed fiber amplifier[J]. Chinese Physics B, 2017(7): 138–143.
- [18] WAN N, CAI J H, QI X, et al. Ultraviolet-enhanced supercontinuum generation with a mode-locked Yb-doped fiber laser operating in dissipative-soliton-resonance region[J]. Optics express, 2018, 26(2): 1689–1696.
- [19] PIOGER P H, COUDERC V, LEPROUX P, et al. High spectral power density supercontinuum generation in a nonlinear fiber amplifier [J]. Optics express, 2007, 15(18): 11358–11363.
- [20] LIN J H, LEE Y W, LIN T C, et al. Near-infrared supercontinuum generation in single-mode nonlinear Yb³⁺-doped fiber amplifier [J]. Optics express, 2014, 22(13): 16130–16138.
- [21] AGHAYARI E, GHALEH K J. High-power supercontinuum generation by noise-like pulse amplification in Yb-doped fiber amplifier operating in a nonlinear regime[J]. Applied optics, 2019, 58(15): 4020–4024.
- [22] BASELT T, TAUDT C, NELSEN B, et al. Experimental study of supercontinuum generation in an amplifier based on an Yb³⁺ doped nonlinear photonic crystal fiber[C]//Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XV. International Society for Optics and Photonics 2016, February 13–18, 2016, San Francisco, USA. California: SPIE LASE, 2016: 97310L-1–97310L-7.
- [23] KWON Y, PARK K, HONG S, et al. Numerical study on the supercontinuum generation in an active highly nonlinear photonic crystal fiber with flattened all-normal dispersion [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(5): 1–8.
- [24] AN Y, YU Y, CAO J, et al. Power scalability of a single-stage Yb-doped superfluorescent fiber source [J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(2): 025105-1–025105-7.
- [25] VAZQUEZ-ZUNIGA L A, FENG X, KWON Y, et al. W-type highly erbium-doped active soft-glass fibre with high nonlinearity [J]. Electronics Letters, 2016, 52(12): 1047–1048.
- [26] YANG L, ZHANG B, WU T, et al. Watt-level mid-infrared supercontinuum generation from 2.7 to 4.25 μ m in an erbium-doped ZBLAN fiber with high slope efficiency[J]. Optics letters, 2018, 43(13): 3061–3064.
- [27] YANG L, ZHANG B, YIN K, et al. Towards a supercontinuum generation in an all-fiberized holmium-doped ZBLAN fiber amplifier [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3193–3197.
- [28] ROMANO C, JAOUN Y, TENCH R E, et al. Ultra-flat supercontinuum from 1.95 to 2.65 μ m in a nanosecond pulsed Thulium-doped fiber laser[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102113-1–102113-5.