

全光纤保偏放大器产生 196 W 近红外超连续谱

张 彬 靳爱军 马鹏飞 陈胜平* 侯 静

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 采用全光纤结构保偏光纤放大器生成了高偏振度超连续谱。种子源使用一个中心波长为 1064 nm, 重复频率、脉冲宽度均可调的保偏脉冲光纤激光器, 将种子激光器设置在重复频率 5 MHz, 脉宽 150 ps, 输出功率 80 mW。种子光经过一个主振荡功率放大(MOPA)结构的保偏光纤放大器进行功率放大, 经过两级预放大器 and 一级主放大器进行功率放大, 并在主放大器中使光谱展宽, 产生了高偏振度的超连续谱激光。主放大器采用纤芯/内包层直径为 25 μm /400 μm 的保偏双包层掺镱光纤, 其长度为 11 m, 在 976 nm 处的吸收系数为 2.2 dB/m。当主放大器的抽运光功率为 355 W 时, 得到的超连续谱激光输出平均功率为 196 W, 斜率效率为 55%, 输出光谱范围为 0.85~1.86 μm 。

关键词 光纤光学; 光纤激光器; 高偏振度超连续谱; 主振荡功率放大器; 保偏放大器; 双包层保偏掺镱光纤

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s206005

196 W Near Infrared Supercontinuum Generation in an All-Fiber Polarization-Maintaining Power Amplifier

Zhang Bin Jin Aijun Ma Pengfei Chen Shengping Hou Jing

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Polarization-maintaining (PM) supercontinuum is generated in an all-PM-fiber amplifier. A tunable fiber pulse laser with the central wavelength 1064 nm is used as the seed of the master-oscillation power-amplifier (MOPA), and the output power of the seed is 80 mW while the repetition frequency and the pulse width are tuned to 5 MHz and 150 ps, respectively. The pulse is amplified through two PM-pre-amplifiers and then coupled into 11 m long double-cladding PM ytterbium-doped fiber (YDF), which has core/inner-cladding dimensions of 25 μm /400 μm and the absorption coefficient of the fiber is 2.2 dB/m at 976 nm. With the pumped power of 355 W, the average power of the supercontinuum generated in the amplifier is measured as 196 W, with the slope efficiency of 55%, while the spectra extend from 0.85 μm to 1.86 μm .

Key words fiber optics; fiber laser; high polarization supercontinuum; master-oscillation power-amplifier; polarization-maintaining amplifier; double-cladding polarization-maintaining ytterbium-doped fiber

OCIS codes 060.4370; 320.6629; 060.2420; 060.3735; 060.2370

1 引 言

超连续谱光源诞生以来, 由于输出光谱较宽, 亮度较高, 并且具有良好的空间相干性和方向性等优势, 引起了广大科研工作者的极大兴趣, 在非线性光学领域掀起了一场革命^[1-2]。进入 21 世纪以来, 超连续谱光源

收稿日期: 2015-03-20; **收到修改稿日期:** 2015-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61235008)

作者简介: 张 彬(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光与光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: gfkdzhb@163.com

导师简介: 侯 静(1975—), 女, 博士, 研究员, 主要从事光纤激光与光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: houjing25@sina.com

*通信联系人。E-mail: chespn@163.com

仍然保持着快速发展,不同结构的光子晶体光纤(PCF)层出不穷,对应抽运源的各项参数也千变万化,超连续谱的光谱范围不断向紫外和中红外方向扩展,输出功率水平不断提高,其在计量学、通信技术以及成像学等领域的广泛应用和巨大潜力被各国科研人员一致看好^[3-5]。而在这些应用中,在一些特殊的应用场合,如相干通信、相干型传感系统以及高光谱成像等^[6],对于超连续谱的偏振度具有很高的要求。相比于随机偏振态的超连续谱,针对保偏输出的超连续谱研究具有更大的研究潜力。目前国内外针对保偏输出超连续谱的研究主要有两种方法,一是使用保偏 PCF[或微结构光纤(MOF)]作为非线性介质进行光谱展宽和偏振保持^[7-8],二是用保偏放大器产生线偏振超连续谱^[9]。这两种方法中,保偏 PCF 由于灵活的色散特性、高非线性以及高保偏特性,是产生高偏振度超连续谱光源的理想介质,然而由于非线性系数越高,PCF 芯径越小,承受的功率极限越低,因此保偏 PCF 无法做到高功率输出。近年来光纤放大器作为非线性介质在输出超连续谱光源方面吸引了越来越多科研工作者的注意。该方法相对 PCF 输出超连续谱光源而言具有系统结构简单,系统整体熔接损耗较低,光-光转换效率高,以及对输出超连续谱功率承受极限较大等优势,虽然输出光谱宽度较 PCF 窄,但可以通过在放大器输出端接一段被动光纤以增加非线性效应长度来进行一定程度的弥补。本文设计了一种近红外波段全光纤结构保偏光纤放大器,采用主振荡功率放大系统(MOPA),在主放大器中产生了功率为 196 W,斜率效率为 55%,光谱范围为 0.85~1.86 μm 的保偏输出超连续谱。

2 实验原理及装置

为了获得高功率保偏超连续谱输出,搭建了 MOPA 结构的光纤放大器,实验结构如图 1 所示。

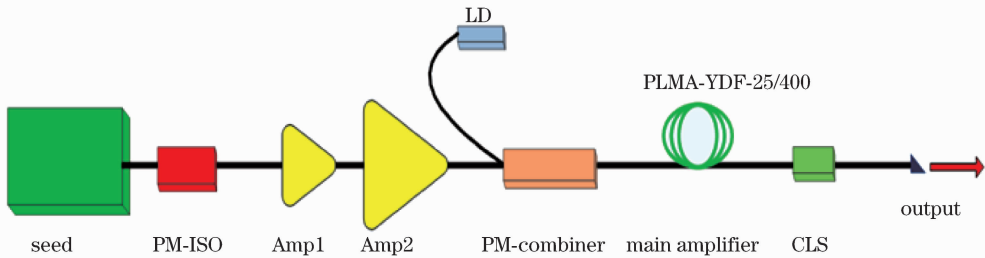


图 1 MOPA 系统保偏放大器结构

Fig. 1 Configuration of the MOPA system

MOPA 技术就是将性能稳定的小功率激光器作为种子源,注入单级或多级放大器系统,实现高功率放大的激光输出。其中种子源的选择十分重要。若种子源功率太低,信号光被掺杂光纤完全吸收,不仅无法实现高功率输出,反而会导致自发辐射放大(ASE)的产生;如果种子信号光功率太高,则无法发挥 MOPA 的优势。设计中用一个重复频率、脉宽可调的皮秒脉冲光纤激光器作为种子源,输出尾纤为纤芯/内包层直径为 10 μm /125 μm 的保偏单模光纤,设置脉宽为 150 ps,重复频率为 5 MHz,经过隔离器之后功率为 80 mW。种子激光器时域与光谱如图 2 所示。第一级放大器采用单模保偏掺杂光纤将激光功率放大至 300 mW。二级预放大器用 976 nm 的激光二极管(LD)抽运一段 3.5 m 长的纤芯/内包层直径为 10 μm /125 μm 的保偏双包层掺镱光纤将激光功率放大至 5 W,其中光纤内/外包层数值孔径分别为 0.07/0.46,976 nm 处的吸收系数为 4.5 dB/m。

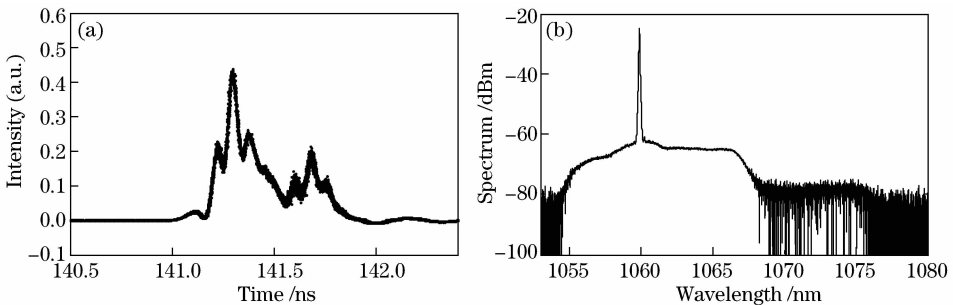


图 2 种子激光器的(a)时域图与(b)光谱图

Fig. 2 (a) Time-domain graph and (b) spectrum of the seed laser

主放大器采用纤芯/内包层直径为 $30\ \mu\text{m}/250\ \mu\text{m}$ 的保偏双包层掺杂光纤, $976\ \text{nm}$ 处的吸收系数约为 $15\ \text{dB/m}$, 长度为 $1.8\ \text{m}$ 。在增益光纤后接一段 $0.5\ \text{m}$ 长的保偏双包层 $30\ \mu\text{m}/250\ \mu\text{m}$ 被动光纤, 在其中部对包层抽运光进行滤除, 输出端切斜角以阻止端面反射。放大器输出功率随抽运光功率的变化如图 3 所示。抽运光波长为 $915\ \text{nm}$, 当抽运光功率为 $320\ \text{W}$ 时输出功率为 $220\ \text{W}$, 斜率效率为 69% 。

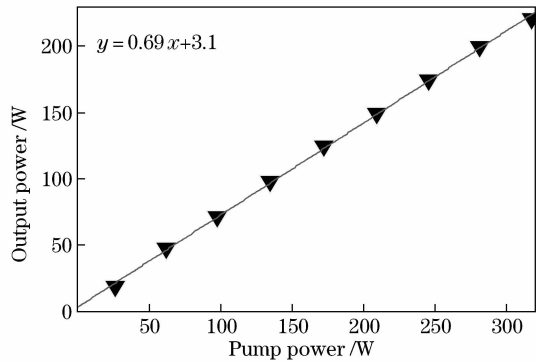


图 3 保偏放大器输出功率随抽运光功率的变化。三角形代表测量值, 实线为拟合曲线
Fig. 3 Output power of the polarization-maintaining amplifier with different pump power.

Triangles denote measured values, and the solid line is the fitted curve

放大器输出光谱随输出功率的变化如图 4 所示。由图 4 发现光谱并没有得到充分展宽, 光谱上仅能观察到两级斯托克斯峰与两级微弱的反斯托克斯峰。

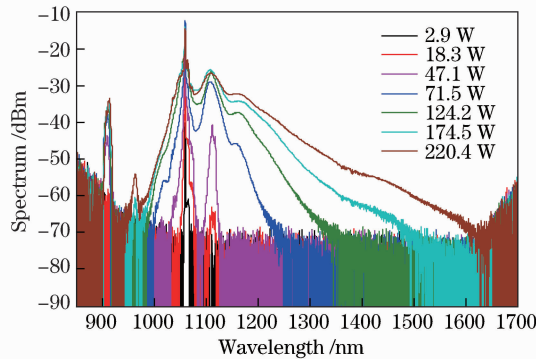


图 4 保偏放大器输出光谱随输出功率的变化

Fig. 4 Output spectra of the polarization-maintaining amplifier with different output power

为了获得光谱更宽的超连续谱光源, 主放大器光纤更换为纤芯/内包层直径为 $25\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 的保偏双包层掺杂光纤, 长度为 $11\ \text{m}$, $976\ \text{nm}$ 处吸收系数为 $2.2\ \text{dB/m}$ 。在增益光纤后接一段 $2\ \text{m}$ 长的 $25\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 保偏双包层被动光纤, 在其中部对包层抽运光进行滤除, 输出端切斜角以阻止端面反射。

放大器输出功率随抽运光功率的变化如图 5 所示, 放大器输出光谱随输出功率的变化如图 6 所示。当抽运光功率增加至 $355\ \text{W}$ 时输出功率为 $196\ \text{W}$, 斜率效率为 55% 。此处斜率效率为增加抽运光滤除 (CLS, 图 1) 之后的效率, 而图 4 所示光谱是测量的纤芯中激光光谱成分, 因此所占比重较大。由于包层中的抽运光已经滤除, 因此实际测得的激光功率中抽运光已经极其微弱, 不影响斜率效率的计算。

3 结果与讨论

由图 6 可以观察到, 当抽运功率为零时, 信号光经过主放大器激发出三阶斯托克斯峰, 同时在信号光的短波边可以观察到一阶微弱的反斯托克斯峰。增益光纤的零色散波长位于 $1270\ \text{nm}$, 此时在 $1480\ \text{nm}$ 处也可以看到一个微弱的光谱峰, 由于 $1480\ \text{nm}$ 也是信号光的一级斯托克斯峰位置, 因此可以得知当信号光在受激拉曼散射效应的作用下光谱展宽到反常色散区时, 也会受到受激拉曼散射效应的影响, 在拉曼增益最强的波长处最容易产生新的光谱成分。同时, 在零色散波长附近, 主要受到反常色散区调制不稳定性效应以及孤子效应的影响, 因此拉曼效应被抑制, 不会出现相应的斯托克斯峰。

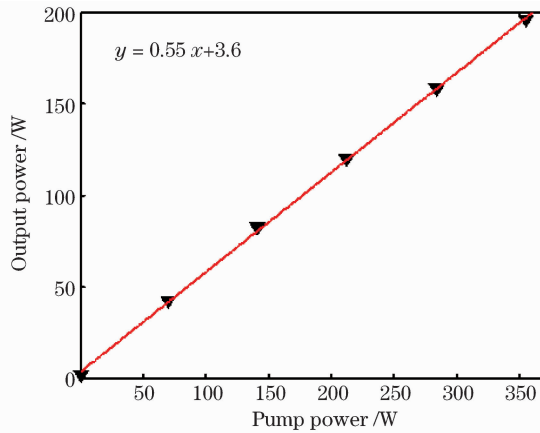


图 5 保偏放大器输出功率随抽运光功率的变化。三角形代表测量值,实线为拟合曲线
Fig. 5 Output power of the polarization-maintaining amplifier with different pump power.
Triangles denote measured values, and the solid line is the fitted curve

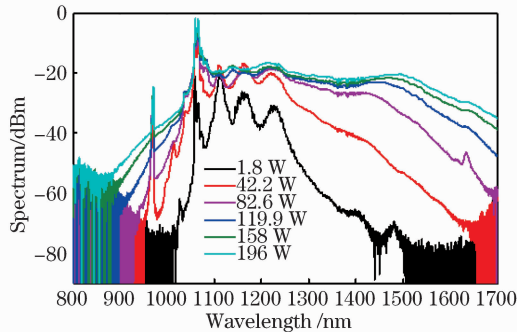


图 6 保偏放大器输出光谱随输出功率的变化

Fig. 6 Output spectra of the polarization-maintaining amplifier with different output power

当逐渐增加抽运光功率时,输出功率逐渐增加,并且光谱得到拓展。由图 6 可知,在没有抽运光时,信号光在拉曼效应的作用下向斯托克斯峰转化得很充分,但是当注入抽运光时,信号光被放大,并且不能充分转移到斯托克斯峰。同时随着输出功率的增加,反常色散区的光谱得到极大拓展,在孤子自频移效应的作用下,光谱展宽至 1700 nm 以上。同时短波边光谱也拓展到了 850 nm。使用 1200~2400 nm 测量范围的光谱仪对产生的超连续谱光谱进行测量,可得到输出功率为 355 W 时的最终光谱,如图 7 所示。由图可知光谱范围很宽,覆盖 850~1860 nm,并且较为平坦,观察不到明显的斯托克斯峰。

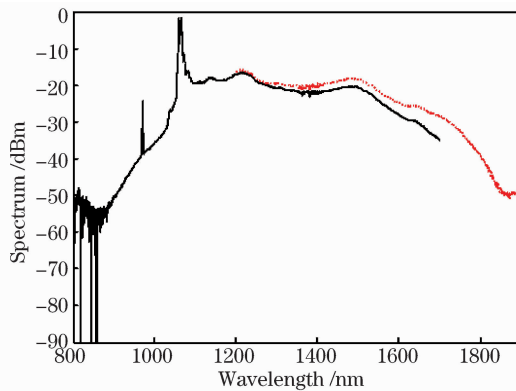


图 7 使用两个测量范围的光谱仪测得输出功率为 196 W 时的光谱
(实线为 600~1700 nm 的测量光谱,虚线为 1200~2400 nm 的测量光谱)

Fig. 7 Output spectra measured by two different optical spectrum analyzers. The solid line stands for the spectrum in the wavelength range of 600~1700 nm, and the dash line stands for that in 1200~2400 nm

4 结 论

进行了全光纤保偏放大器生成保偏输出超连续谱的实验研究,实现了全光纤结构保偏放大器产生功率近 200 W,谱宽超过 1 μm 的超连续谱。采用三级级联放大的方式,在主放大器中用长度为 11 m,纤芯/内包层直径 25 μm /400 μm 的双包层掺杂光纤进行光谱展宽和功率放大,当抽运功率为 355 W 时得到了 196 W 的保偏超连续谱输出,斜率效率为 55%,光谱范围为 0.85~1.86 μm 。分析结果表明,在放大器中利用大芯径的掺杂光纤可以做到在保证光谱展宽要求的前提下得到高功率的超连续谱输出。由于超连续谱光谱范围广,测量偏振度所需器件复杂,受限于实验室条件并没有进行输出激光偏振度(消光比)的检测;同时由于所得超连续谱平均功率近 200 W,采用 M^2 因子测量其光束质量^[10]也十分困难。这些问题将在后续的研究中逐步解决。

参 考 文 献

- 1 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics (4th Edition) [M]. Oxford: Academic Press, 2009.
- 2 Dudley J M, Taylor J R. Supercontinuum Generation in Optical Fibers [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- 3 Wadsworth W, Knight J, Birks T. State-of-the-art photonic crystal fiber [J]. Optics and Photonics News, 2012, 23(3): 24–31.
- 4 Knight J C. Photonic crystal fibers and fiber lasers [J]. JOSA B, 2007, 24(8): 1661–1668.
- 5 Agrawal G P. Applications of Nonlinear Fiber Optics[M]. Oxford: Academic Press, 2008.
- 6 Dianov E M, Frolov A A, Bufetov I A, *et al.*. Fiber fuse effect in microstructured fibers [C]. Optical Fiber Communications Conference, 2003, 2: 686–687.
- 7 Xiong C, Wadsworth W. Polarized supercontinuum in birefringent photonic crystal fibre pumped at 1064 nm and application to tunable visible/UV generation[J]. Optics Express, 2008, 16(4): 2438–2445.
- 8 Deng D, Segal D, Cheng T, *et al.*. Dispersion characterization of two orthogonal modes in a birefringence tellurite microstructured optical fiber [J]. Optics Express, 2014, 22(20): 23920–23927.
- 9 Chang C L, Lin Y Y. Intense supercontinuum generation in a nanosecond nonlinear all-PM-fiber power amplifier [C]. SPIE, 2014, 8961: 89612S.
- 10 Jin Aijun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Evaluation of the beam quality of supercontinuum source using supercontinuum M^2 factor [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502006.

靳爱军,侯 静,姜宗福. 使用超连续谱 M^2 因子评价超连续谱光源光束质量[J]. 中国激光, 2013, 40(5):0502006.

栏目编辑: 吴秀娟