

大能量纳秒脉冲光纤激光器研究进展

李 尧, 张 昆, 李 政, 张浩彬, 余 洋

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘 要:针对应用于激光主动成像系统中的大能量纳秒脉冲光纤激光器光源,介绍了实现大能量短脉冲激光输出的典型结构;概括了相关方向的国内外研究进展,分析了不同技术途径的优缺点;最后对大能量纳秒脉冲光纤激光器的应用和发展前景进行展望。

关键词:光纤激光器;纳秒脉冲;主振荡功率放大;大能量

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.08.014

Research progress of high energy nanosecond pulsed fiber lasers

LI Yao, ZHANG Kun, LI Zheng, ZHANG Hao-bin, YU Yang

(National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100015, China)

Abstract: Aiming at the high energy nanosecond pulse fiber laser source used in laser active imaging system, the typical structure of high energy nanosecond pulse laser output is introduced, the research progress of related direction at home and abroad is summarized, and the advantages and disadvantages of different technical approaches are analyzed. Finally, the application and development prospect of high energy nanosecond pulse fiber laser are prospected.

Keywords: fiber laser; nanosecond pulse; MOPA; high energy

1 引 言

三维成像激光雷达是通过发射激光束探测目标的距离、速度、三维轮廓等特征量的探测系统,可实现多目标成像与探测,具有角度/距离/速度分辨率高、抗干扰能力强、信息量大的特点。

具有大脉冲能量、高峰值功率、高重频、窄脉宽、轻小型、低功耗等特点的纳秒脉冲光纤激光器,非常适合作为光源应用于激光主动成像系统中用于目标探测和成像制导。

近年来,受激光三维成像雷达和光电对抗的需求牵引,国内外对相关纳秒光纤激光器的研究取得了巨大进展。国外比较著名的研究机构包括美国 IPG 公司、英国 Southampton 大学、德国 Friedrichschiller 大学以及美国密歇根大学等,国内包括天津大学、清华大学、中国电科十一所在内的众多单位,都对该领域展现出极大的兴趣,并以提升激光能量

和峰值功率为目标,相继开展了深入技术探索。

本文简要介绍了实现大能量激光输出的纳秒脉冲光纤激光器的典型结构,以及为了提升单脉冲能量国内外采取的相应技术措施及研究进展。最后对大能量纳秒脉冲光纤激光器的应用和发展前景进行展望。

2 国内外研究进展

由于单个谐振腔得到的单脉冲能量较小,脉冲光纤激光器通常采用主振荡功率放大(MOPA)结构实现大能量短脉冲输出^[1-3]。如图 1 所示,MOPA 结构脉冲光纤激光器主要由脉冲激光种子源、光纤预放大器(可能包含多级)和光纤功率放大器三部分组成。

目前主流的脉冲光纤激光器均采用调制后的半导体激光器作为种子源。与其他类型的脉冲种子源相比,半导体激光器具有调制灵活、体积小和可靠性高等突出特点。使用半导体激光调制技术,可以实

现重复频率,脉冲宽度在一定范围内连续可调,也可以实现任意波形的光脉冲输出(包括三角波,正弦波,等等),并且可以利用其任意波形输出的优势来补偿放大过程中的增益饱和现象,有效抑制其放大过程中由于脉冲窄化导致峰值功率过高而出现非线性效应。

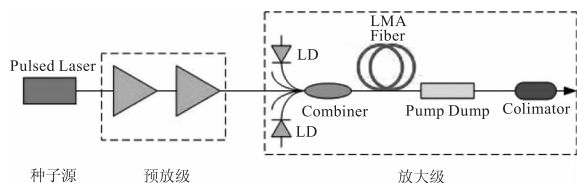


图1 MOPA结构脉冲光纤激光器结构图

Fig.1 Pulse fiber laser with MOPA structure

由于基本采用相同的光纤激光系统设计结构(MOPA),脉冲光纤激光器主要依据功率放大级的增益光纤区分其技术途径。

市场上现有的大能量短脉冲光纤激光器,为了抑制光纤中的各种非线性效应,通常使用基于石英玻璃阶跃折射率的大模场增益光纤,来构建最后一级光纤功率放大级,从而产生所需要的脉冲输出能量。如图2所示,双包层光纤具有相对简单的结构^[4],但由于纤芯尺寸超过了单模截止条件,无法保证激光器的单模运转,造成光束质量下降。

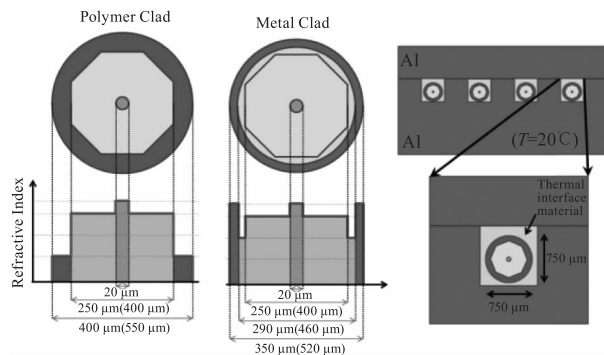


图2 大模场双包层光纤结构示意图

Fig.2 Structure of large mode field double clad fiber

以国外较为成熟的1 μm 高功率脉冲光纤激光器代表——法国 Keopsys 公司制造的 PYFL 系列产品为例,其脉宽为1~4 ns,重复频率50~400 kHz,并且利用VSP(V型槽侧边泵浦)技术,可以得到60 μJ的单脉冲能量,并且具有小于1.3的良好光束质量。

在这种脉冲光纤激光器中,由于增益光纤较长,极大地限制了它们的最大输出能量。例如对于脉

宽度为10 ns量级的激光脉冲,如果要具有良好的光束质量和较窄的光谱宽度,最大的单脉冲能量仅达百 μJ量级,这主要受到增益光纤中受激拉曼散射(SRS)和交叉相位调制(XPM)等非线性效应的限制。由于较强的非线性效应,放大后的激光光谱宽度将展宽至~10 nm,无法满足激光三维成像雷达系统的使用要求。



图3 Keopsys公司高功率脉冲光纤激光器产品

Fig.3 Keopsys high power pulsed fiber laser products

在过去的近十年中,已经有大量的努力来应对这一挑战,主要的技术途径为采用光子晶体光纤、手性耦合光纤、硅酸盐玻璃光纤等新型光纤作为功率放大级的增益光纤来抑制激光放大过程中产生的非线性效应。

2.1 光子晶体光纤

光子晶体光纤(PCF)又被称为微结构光纤。如图4所示,光子晶体光纤横截面上有较复杂的折射率分布,通常含有不同排列形式的气孔,这些气孔的尺度与光波波长大致在同一量级且贯穿器件的整个长度,光波可以被限制在低折射率的光纤芯区传播^[5]。

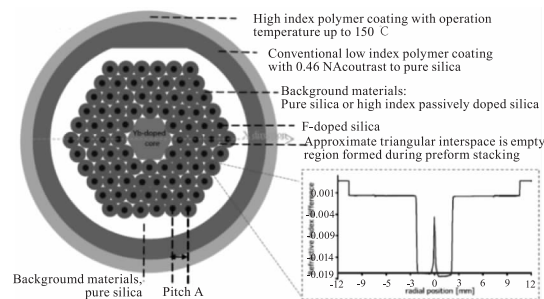


图4 大纤芯直径光子晶体光纤结构示意图

Fig.4 Structure of large core diameter photonic crystal fiber

在具有超大纤芯直径的棒状光子晶体光纤中,早就演示了可以产生单脉冲能量达到数 mJ 级的能力。2013年,美国诺格公司采用纤芯直径100 μm的光子晶体光纤作为增益介质,获得了峰值功率1.5 MW,单脉冲能量2.3 mJ,脉冲宽度1.55 ns,线

宽 60 GHz 的脉冲激光输出^[6]。

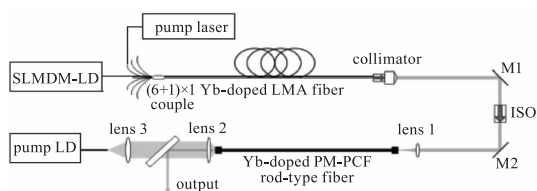


图 5 棒状光子晶体光纤纳秒脉冲放大系统

Fig. 5 Nanosecond pulse amplification system

based on rod photonic crystal fiber

但光子晶体光纤尚未在商用脉冲光纤激光器系统得到广泛应用,主要原因在于其缺少信号激光和泵浦激光耦合的全光纤解决方案,不得不使用类似于固体激光器中脆弱的自由空间光耦合方案,这样就完全失去了光纤激光器本身的最大优点,也就是其高度的紧凑性和可靠性。

2.2 手性耦合纤芯光纤

手性耦合纤芯光纤(CCC 光纤)的芯径比传统的大模场面积双包层光纤大得多,并且能够实现单模输出。如图 6 所示,CCC 光纤由中心的导引纤芯和至少一根螺旋型围绕在中心纤芯周围的卫星纤芯组成^[7]。中心的导引纤芯芯径通常在 30 μm 以上,对信号光起传输和放大的作用;卫星纤芯芯径通常约 10 μm ,对在中心导引纤芯中传输的光起着模式控制的作用。

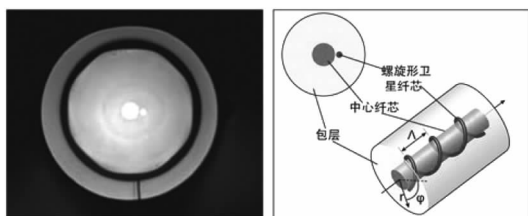


图 6 CCC 光纤结构示意图

Fig. 6 Structure of CCC fiber

这种结构设计可以有选择的将中心纤芯中的高阶光学模耦合到卫星纤芯中,同时只有 LP_{01} 模在中心纤芯中传输。当满足准相位匹配条件时,中心导引纤芯中的高阶模耦合进卫星纤芯中。合适的卫星纤芯参数和螺旋周期可以导致耦合进入卫星纤芯的光模式产生高损耗,并被迅速损耗掉,使中心纤芯中只剩下基模,并以近乎无损耗的状态进行传输,从而实现有效单模工作。这种概念可以应用到非常大芯径的光纤的设计中。

近年来,多个研究机构采用 CCC 光纤取得了巨

大进展。早在 2013 年,美国密歇根大学采用纤芯直径 55 μm 的 CCC 光纤作为增益介质,获得了单脉冲能量 9.1 mJ 的脉冲激光输出,具体实验结果如图 7 所示^[8]。

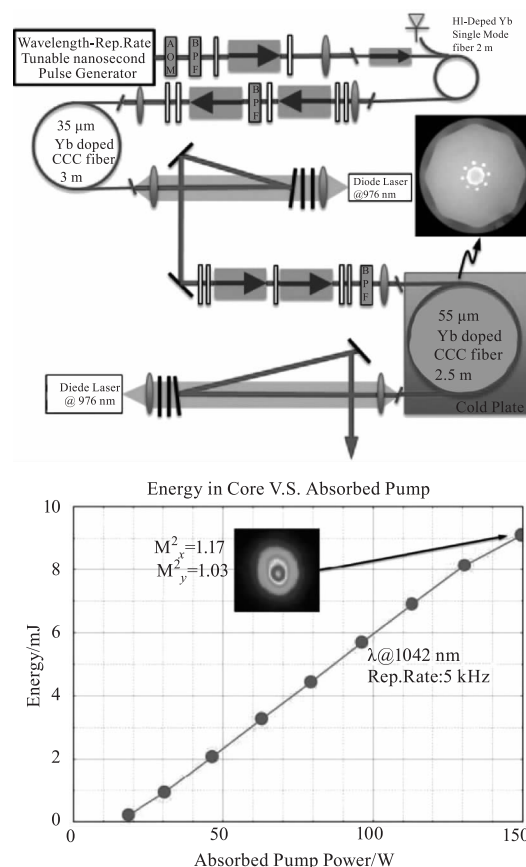


图 7 CCC 光纤纳秒脉冲放大系统

Fig. 7 CCC fiber nanosecond pulse amplification system

由于 CCC 光纤制备工艺复杂,暂未获得进一步的成熟应用。

2.3 硅酸盐玻璃光纤

传统的有源石英光纤的稀土掺杂浓度低,光纤长度较长,不利于光束的远程传播和高功率光纤激光器的发展。硅酸盐玻璃光纤稀土掺杂浓度很高,比石英光纤高 2 个数量级,可以利用很短长度的光纤实现高增益。

图 8 是双包层保偏钕共掺杂的大模场硅酸盐玻璃光纤的截面。这种光纤具有纤芯尺寸大、数值孔径小、非线性阈值高等特点。因此,尽管这种大模场增益光纤纤芯直径比大多数市售类似的掺钕光纤产品大得多,但由于其独特的设计($\text{NA} < 0.04$),激光输出的光束质量仍然可以保持几乎衍射极限模式。



图8 高掺杂硅酸盐玻璃光纤横截面图

Fig. 8 Cross section of highly doped silicate glass fiber

2018年,美国 Advalue 公司利用此种光纤,研制了首台大脉冲能量硅酸盐玻璃光纤脉冲光纤激光器。在傅里叶变换受限线宽极限下,其输出单脉冲能量超过了 $1.8 \text{ mJ}^{[9]}$,如图9所示。

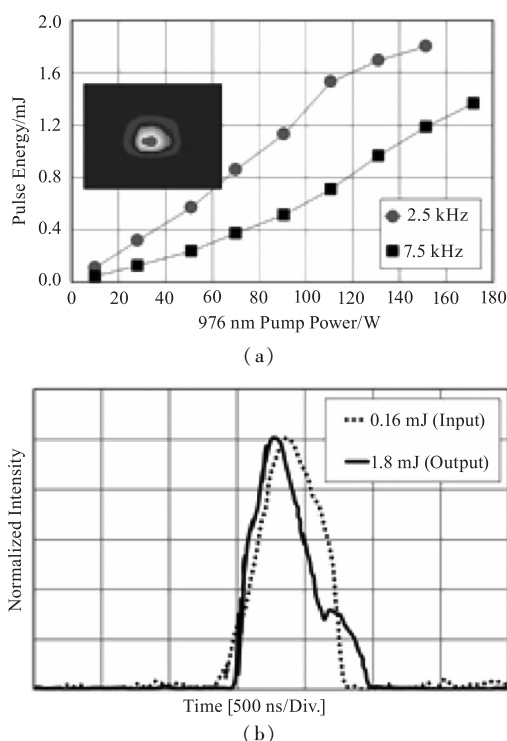


图9 基于硅酸盐玻璃光纤的脉冲光纤激光器

Fig. 9 Pulsed fiber laser based on silicate glass fiber

这种玻璃光纤的独特性在于其非常高的稀土离子掺杂,使其在很短的大模场增益光纤中产生高光学增益,输出单模场的高能量激光脉冲。利用这种特殊的增益光纤组成的光纤激光器,大幅度提高了非线性光学效应的阈值,并保持高光束质量。但硅酸盐玻璃光纤的熔点低于普通的石英光纤,在两种光纤的高质量熔接工艺上还需开展进一步探索。

2.4 锥形光纤

随着光纤激光振荡器与放大器功率水平的不断提升,诸如泵浦亮度、光纤热损伤、光纤端面损伤、热

透镜效应、模式不稳定以及各种非线性效应等限制高功率光纤激光功率提升的因素不断显现,光纤纤芯在较长尺度上变化的长锥形光纤受到关注。长锥形光纤由于其自身纤芯直径随长度变化的特点,在抑制 SBS、SRS 方面有先天的优势。俄罗斯科学院、芬兰坦佩雷理工大学、加拿大国家光学所相继报道了长锥形光纤的理论研究以及在光纤激光振荡器和放大器中的应用。

图10为锥形光纤的结构示意图。光纤输入端为 $35/250 \mu\text{m}$ 光纤,长度 1 m ;中间的锥形部分为从 $250 \mu\text{m}$ 到 $400 \mu\text{m}$ 的锥形区,长度 0.7 m ;输出端为 $56/400 \mu\text{m}$ 光纤,长度 1 m 。 $35/250 \mu\text{m}$ 光纤段的盘绕直径的设计对于滤除高阶模式和确保在锥形区域放大激光的最佳模式质量至关重要。

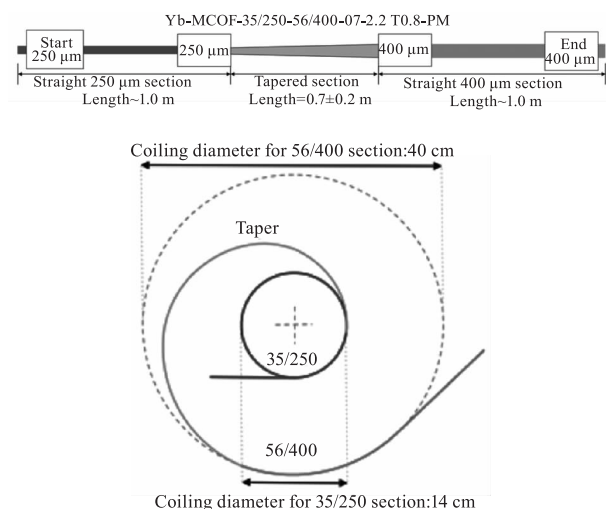


图10 锥形光纤结构示意图

Fig 10 Structure of tapered fiber

2017年,俄罗斯科学院报道了一种反向泵浦的大模面积高掺铒保偏锥形光纤新型放大结构^[10]。放大信号在锥形光纤的窄端传播而不进行放大,在锥形光纤的粗端获得极高的增益。在这种情况下,可直接从放大器获得高峰值功率。 8 ps 脉冲放大后峰值功率高达 0.76 MW ,继续增长受到 SRS 的限制。 28 ps 啁啾脉冲可从放大器直接放大到 0.35 MW 的峰值功率,然后以 70% 的效率压缩到 $(315 \pm 10) \text{ fs}$,此时对应于 22 MW 的峰值功率。

由此可见,长锥形光纤作为高功率光纤激光系统中的增益介质,具有光束质量优良、可支持高峰值功率大脉冲能量的优点,虽然目前以空间耦合结构居多,在集成度和稳定性上有所欠缺,但具有面向高峰值功率、大脉冲能量、单频窄线宽脉冲激光器的发

展趋势。

在高峰值功率纳秒脉冲光纤激光器的研究方面,目前国内的相关研究主要集中于石英光纤放大器的研究,研究单位包括天津大学、国防科技大学、深圳大学等等,但是输出激光的光束质量和光谱宽度无法满足激光主动成像系统的要求。目前清华大学采用光子晶体光纤方案开展了相关研究。

2014 年,天津大学报道了一种基于 MOPA 结构的纳秒脉冲光纤激光器,经过多级放大后使用 0.78 m 纤芯内包层直径为 50/400 的双包层掺镱光纤作为增益介质,在 976 nm 激光泵浦下,最终得到了脉宽 3.3 ns,峰值功率 709 kW,重复频率 10 kHz,单脉冲能量 2.34 mJ 的脉冲激光输出,如图 11 所示^[11]。

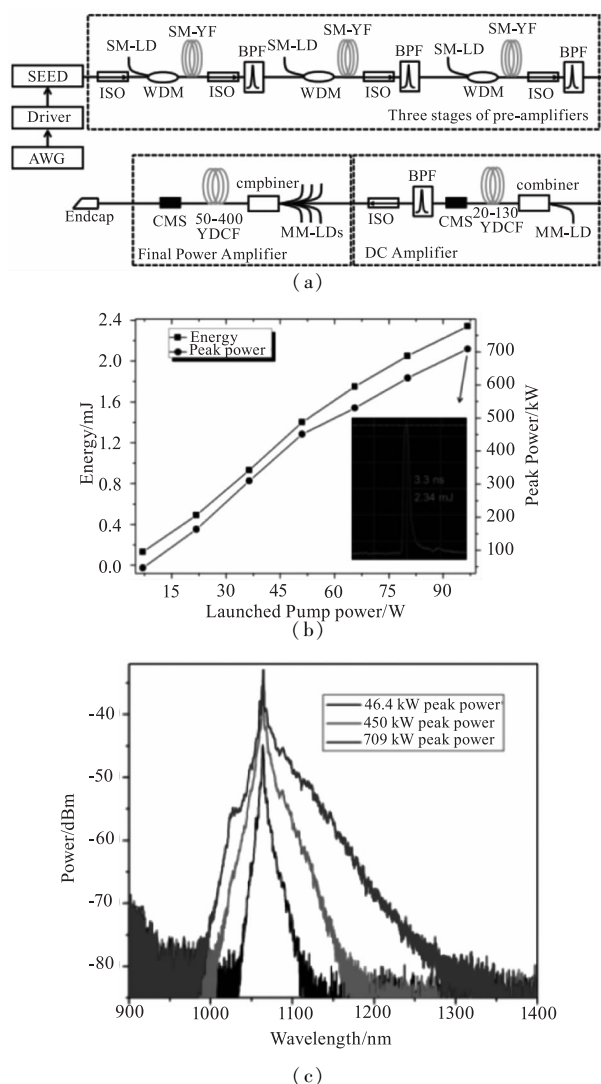


图 11 基于大模场双包层光纤的脉冲光纤激光器

Fig. 11 Pulsed fiber laser based on double clad

fiber with large mode field

2015 年,国防科技大学报道了三级级联 MOPA 结构的纳秒脉冲光纤激光器。通过在功率放大级采用低数值孔径的双包层掺镱光纤抑制激光放大过程中的 SRS,实现了最大输出功率 736 W、重复频率 1.9 MHz、脉冲宽度 6.47 ns 的激光输出,对应单脉冲能量 0.39 mJ,峰值功率 64 kW,如图 12 所示^[12]。

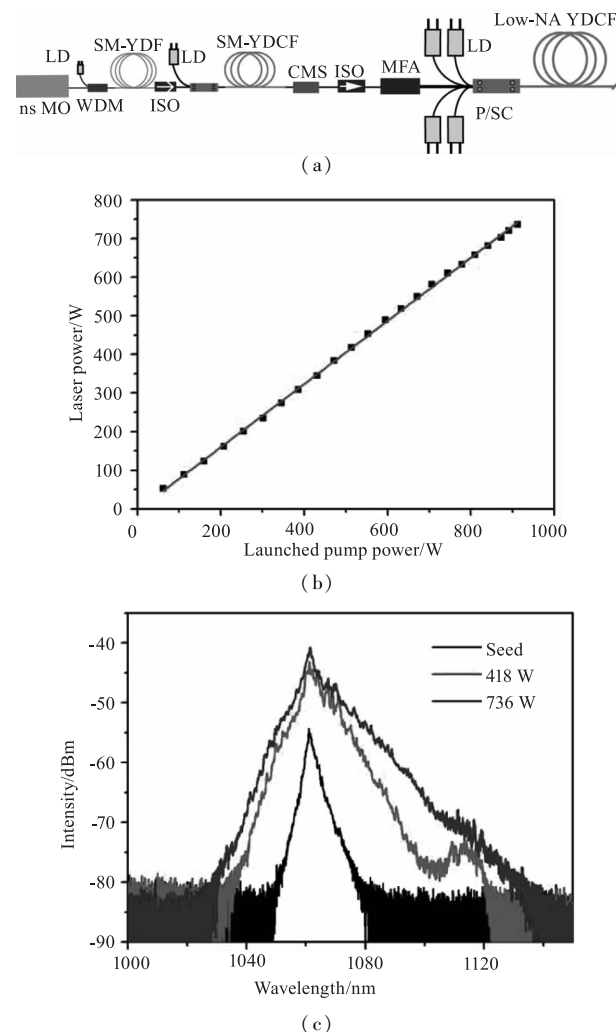


图 12 基于低数值孔径的双包层掺镱光纤纳秒脉冲光纤激光器

Fig. 12 Nanosecond pulse fiber laser based on double clad Yb doped fiber with low NA

2017 年,深圳大学报道了一种基于 MOPA 结构直接调制种子源的 1 μm 脉冲光纤激光器,通过调节驱动电流脉冲进而控制输出激光脉冲宽度、形状以及重复频率,结构如图 13 所示。经过一级预放后使用 7 米长纤芯/内包层直径为 30/250 μm 的掺镱光纤作为增益介质,最终在 80 ns 的脉宽下得到了 1.4 mJ 的脉冲激光输出,光束质量约为 1.7,光光效率约为 67 %^[13]。

2012 年,清华大学报道了一种基于 MOPA 结构

掺镱光子晶体光纤作为增益介质的脉冲光纤激光器,如图14所示。其在1063 nm重复频率1.5 MHz,脉宽2 ns的条件下得到了88 W的平均功率,最大峰值功率为112 kW,半峰全宽小于0.065 nm,且得到了小于1.3的良好光束质量^[14]。

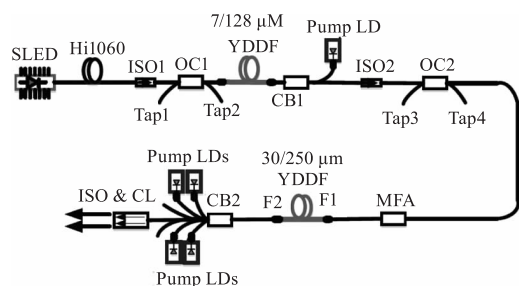


图13 MOPA结构直接调制种子源的1 μm脉冲光纤激光器

Fig. 13 1 μm MOPA pulse fiber laser with direct modulation of seed source

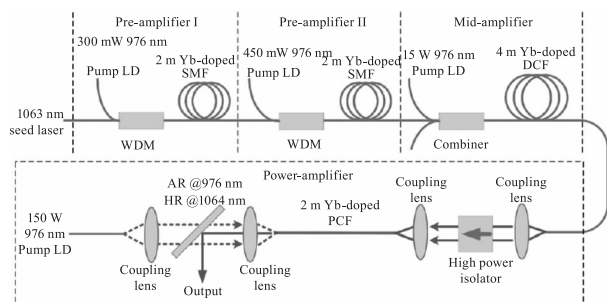


图14 MOPA结构掺镱光子晶体光纤脉冲光纤激光器

Fig. 14 Yb doped photonic crystal fiber pulsed fiber laser with MOPA structure

国防科技大学基于大模场长锥形增益光纤特殊的结构设计和强泵浦吸收特性,实现了全光纤结构单频光纤放大器中SBS、TMI和ASE等多重受限因素的综合抑制,获得了输出功率达550 W高光束质量单频光纤激光输出^[15],如图15所示。

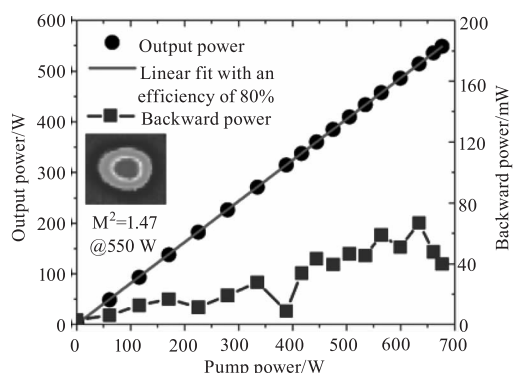


图15 基于锥形光纤的高光束质量单频光纤激光器

Fig. 15 Single frequency fiber laser based on tapered fiber

综上所述,应用于激光三维成像系统的纳秒脉

冲光纤激光器通常采用MOPA结构,并依据功率放大级增益光纤区分其技术途径。受限于非线性效应,商用脉冲光纤激光器(基于石英阶跃折射率光纤)的单脉冲能量仅为0.1 mJ量级;若采用光子晶体、3C、磷酸盐玻璃、锥形光纤等新型光纤,可将单脉冲能量提升至10 mJ量级,更好地满足激光主动成像系统的应用需求。

3 发展与展望

以光子晶体光纤、CCC光纤、硅酸盐玻璃光纤、锥形光纤等新型光纤为代表的光纤激光器各有特点,逐渐发展为实现mJ级脉冲光纤激光最有前景的技术路径之一。未来的大能量短脉冲纳秒光纤激光器致力于获得结构简单、模式稳定和抗环境干扰能力强等优点,作为三维成像激光雷达系统中的光源,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Zhang K, Zhou S H, Li Y, et al. 142 W high peak power narrow-linewidth linearly polarized pulsed fiber laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0405003 - 1 - 0404003 - 6. (in Chinese)
张昆,周寿恒,李尧,等. 142 W 高峰值功率窄线宽线偏振脉冲光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0405003 - 1 - 0404003 - 6.
- [2] Su R T, Zhou P, Xiao H, et al. MOPA structured single-frequency nanosecond pulsed laser in all fiber format[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11): 1102013 - 1 - 1102013 - 4. (in Chinese)
粟荣涛,周朴,肖虎,等. MOPA结构的单频纳秒脉冲全光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102013 - 1 - 1102013 - 4.
- [3] Wang Y X, Jiang P P, Yang D Z, et al. All-fiberized master oscillator power amplifier structured pulsed Yb fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1681 - 1685. (in Chinese)
汪园香,姜培培,杨丁中,等. 全光纤结构主振荡功率放大大型掺镱脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1681 - 1685.
- [4] Daniel J M O, Simakov N, Hemming A, et al. Metal clad active fibers for power scaling and thermal management at kW power levels[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18592 - 18606.
- [5] Wei H, Chen K, Yang Y, et al. All-solid very large mode area ytterbium-doped silica microstructured fiber based on

- accurate control on cladding index [J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8978–8987.
- [6] Teodoro F D, Morais J, McComb T S, et al. SBS-managed highpeak-power nanosecond-pulse fiber-based master oscillator power amplifier [J]. Optics Letters, 2013, 38(13): 2162–2164.
- [7] Swan M C, Liu C H, Guertin D, et al. 33 μ m Core Effectively Single-Mode Chirally-Coupled-Core Fiber Laser at 1064-nm [C]//IEEE, 2008.
- [8] Cheng Z, Hu I, Ma X, et al. Single mode 9.1mJ and 10ns pulses from 55 μ m core Yb-doped CCC fiber MOPA [C]//Lasers & Electro-optics. IEEE, 2014.
- [9] Lee W K, Geng J H, Jiang S B, et al. 1.8mJ, 3.5kW single-frequency optical pulses at 1572nm generated from an all-fiber MOPA system [J]. Optics Letters, 2018, 43(10): 2264–2269.
- [10] Konstantin B, Alexey A, Maxim K, et al. Sub-MW peak power diffraction-limited chirpedpulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 26958–26972.
- [11] Wei S, Qiang F, Fan J. 700kW peak power monolithic nanosecond pulsed fiber laser [C]// Lasers & Electro-optics. IEEE, 2014.
- [12] Huang L J, Sun H V, Leng J Y, et al. 736W Average Power All-fiber Nanosecond MOPA Based on Ultra-lowNA Ytterbium Doped Fiber [C]. //Advanced Solid State Lasers. OSA, 2015.
- [13] Meng L, Ping P S, Zhang B M, et al. 160 W nanosecond ytterbium-doped pulsed fiber laser [C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2017.
- [14] Chen H, Yan P, Xiao Q, et al. PCF based high power narrow line width pulsed fiber laser [J]. Applied physics, 2012, B108(3): 635–639.
- [15] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. 550-W Single-frequency All-fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0415001–1–0415001–3. (in Chinese)
- 来文昌, 马鹏飞, 刘伟, 等, 全光纤单频光纤放大器实现 550W 近衍射极限输出 [J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0415001–1–0415001–3.