

基于 GTWave 技术的脉冲光纤激光器

赵治国¹, 申向伟², 吴中超², 王大贵², 王晓新², 王智林², 何晓亮²

(1. 中国电子科技网络信息安全有限公司, 四川 成都 610041; 2. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要:该文介绍了常用的几种泵浦耦合技术。利用增益/泵浦一体化光纤(GTWave)侧面泵浦耦合技术, 采用制备的 25/250 GTWave 光纤搭建了重复频率 10 kHz、平均功率 24.59 W、单脉冲能量高达 2.459 mJ 及峰值功率 10 kW 的脉冲光纤激光器。分析了采用该光纤进一步提高输出单脉冲能量的方法。结果表明, 该光纤能够实现很高的单脉冲能量输出。

关键词: GTWave 侧面泵浦耦合技术; 单脉冲能量; 光纤激光器; 峰值功率; 模场匹配

中图分类号: TN248; TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.02.008

Pulsed Fiber Laser Based on GTWave Technology

ZHAO Zhiguo¹, SHEN Xiangwei², WU Zhongchao², WANG Dagui²,
WANG Xiaoxin², WANG Zhilin², HE Xiaoliang²

(1. China Electronics Technology Cyber Security Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

2. The 26th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Several common pump coupling technologies were introduced in this paper. A pulsed fiber laser with repetition frequency of 10 kHz, output power of 24.59 W, single pulse energy of 2.459 mJ and peak power of 10 kW was constructed with GTWave side pumped coupling technology by using the prepared 25/250 GTWave optical fibers. Moreover, a method for further increasing the single pulse energy of the output pulse by using this optical fiber is analyzed. The results show that the fiber can achieve very high single pulse energy output.

Key words: GTWave side pumped coupling technology; single pulse energy; fiber laser; peak power; mode field matching

0 引言

光纤激光器具有体积小、质量小、光束质量好、泵浦转化效率高、维护简单等优点,在国防、医疗、通信、工业加工等相关领域应用广泛,成为激光器产业的主导力量^[1-5]。随着光纤激光应用领域的不断拓展,人们对激光器单脉冲能量、峰值功率的要求越来越高。但高单脉冲能量和峰值功率的激光输出会导致纤芯的功率密度过高,易引起受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)等非线性效应,产生峰值功率过高的窄脉冲,烧毁光纤。传统方式是采用增大光纤的有效模场面积来降低纤芯的功率密度,但此方法一方面会激发光纤的高阶模,恶化激光器输出的光束质量,另一方面会提高光纤激光器的成本,降低其市场竞争力。Sakai J、Limpert J等^[6-7]通过降低光纤纤芯的数值孔径,结合增大模场面积来抑制非线性效应,实现单模高能量输出。但此方法

受普通光纤材料的限制,数值孔径只能降低到0.05左右,而数值孔径过低会使弯曲损耗过高。

本文利用增益/泵浦一体化光纤(GTWave)侧面泵浦耦合技术,增加了泵浦光和增益光纤的耦合长度,降低了单纤传输的功率密度,在不增加弯曲损耗和降低光束质量的基础上,提高了承受的单脉冲能量和峰值功率,最后实现了波长 1 064 nm、单脉冲能量 2.459 mJ、峰值功率 10 kW、光束质量 1.15 的脉冲激光器。其在工业加工、医疗等领域具有广阔的应用前景。

1 泵浦耦合技术

双包层光纤激光器的泵浦耦合技术是将高亮度的半导体激光耦合到双包层光纤的内包层中。主要有端面泵浦耦合技术和侧面泵浦耦合技术。端面泵浦耦合主要采用透镜耦合和直接熔融耦合两种方式,如图 1 所示。

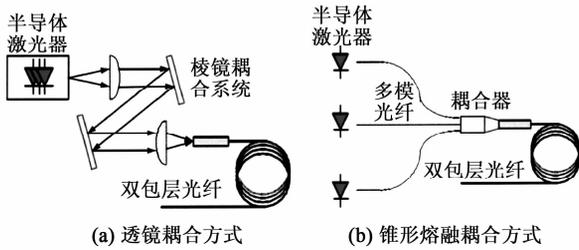


图 1 端面泵浦耦合技术

透镜耦合效率为 60%~70%，但操作复杂，稳定性差。直接熔融耦合效率可达 90%，但耦合数量和耦合结构受限，且当注入泵浦功率过高时，光纤端面易被烧坏。

侧面泵浦耦合技术主要有嵌入透镜式^[8]、V 型槽式^[9]、侧面熔接式^[10]、反射光栅式^[11]和 GTWave 式^[12]。

图 2 为嵌入透镜式侧面泵浦耦合技术。该方式在双包层光纤内包层上刻一个小槽，然后嵌入反射镜，最大耦合效率可达 80%。但由于使用了光学胶，因而耦合功率受限。

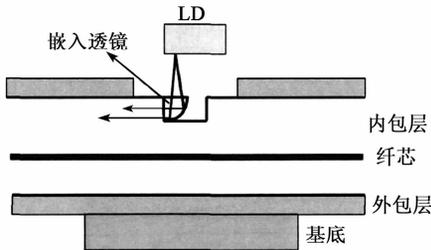


图 2 嵌入透镜式侧面泵浦耦合技术

图 3 为 V 型槽式侧面泵浦耦合技术。在双包层光纤侧面加工一个 V 型槽，耦合效率可达 80%，但该方式对光纤加工工艺要求高，承受光功率和系统稳定性受限。

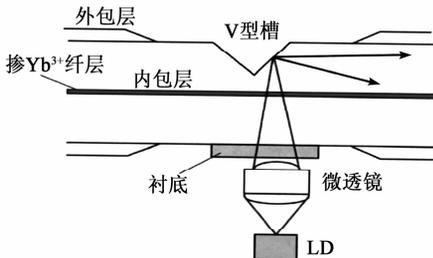


图 3 V 型槽式侧面泵浦耦合技术

图 4 为侧面熔接式侧面泵浦耦合技术。将信号光纤和泵浦光纤去掉涂覆层，然后熔融拉锥，将泵浦耦合进信号光，耦合效率可达 90%，是目前高功率光纤激光器主流方式，但该方式耦合效率与拉锥长度、角度、深度等多种因素有关，且泵浦注入位置单一，所以光纤纤芯传输和包层瞬间传输的功率密度

很大。光纤传输的单脉冲能量受限。

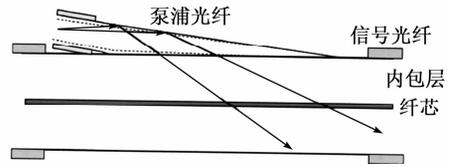


图 4 侧面熔接式侧面泵浦耦合技术

图 5 为反射光栅式侧面泵浦耦合技术。该方式剥离掉信号光纤的涂覆层，不用破坏光纤的包层，但耦合效率和入射光的偏振性有关，且该方式采用了光学胶，耦合泵浦光功率受限。

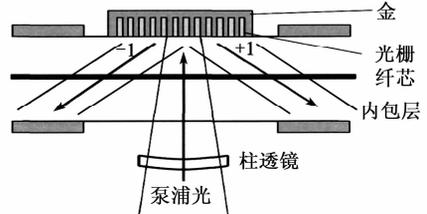


图 5 反射光栅式侧面泵浦耦合技术

图 6 为 GTWave 侧面泵浦耦合技术。该方式采用无包层泵浦光纤和单包层的信号光纤平行排列。两根光纤在光学上相连，在物理上分量。由于泵浦光纤中的泵浦光光场可作用到信号光纤中，从而实现了泵浦光的耦合，且这种耦合的耦合长度长，是缓慢和渐进式的耦合，一方面可将泵浦产生的热量分散，提高光纤稳定性，另一方面降低了瞬间泵浦注入功率密度，提高光纤承受的单脉冲能量和峰值功率。耦合效率可达 90%，是制作高功率激光器的理想选择。

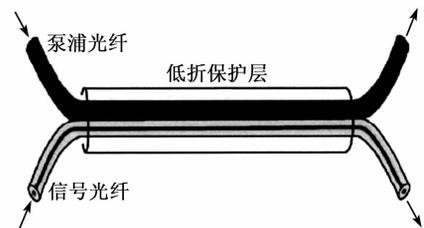


图 6 GTWave 式侧面泵浦耦合技术

2 激光器的搭建和测试结果

本文采用中国电科天之星激光技术有限公司拉制的 25/250 GTWave 光纤，其光纤端面如图 7 所示。由图可看出，该光纤泵浦纤纤芯直径为 $\varnothing 253.56 \mu\text{m}$ ，无包层光纤。信号光纤纤芯直径为 $\varnothing 25.56 \mu\text{m}$ ，包层直径为 $\varnothing 257.12 \mu\text{m}$ 。实验中，泵浦光纤为 $105 \mu\text{m} / 125 \mu\text{m}$ 光纤，信号输出光纤为 $10 \mu\text{m} / 125 \mu\text{m}$ 双包层光纤。在信号光纤及泵浦光纤输入/输出处采用模场匹配，系统结构如图 8

所示。

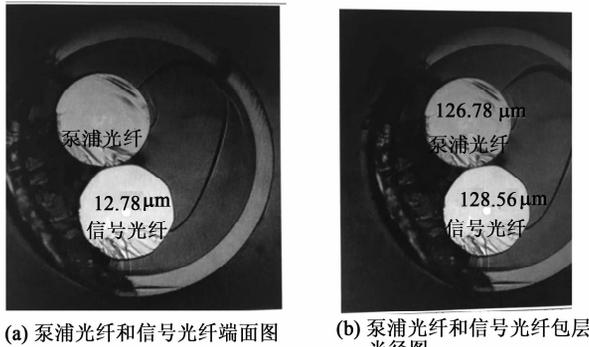


图7 GTWave 光纤端面图

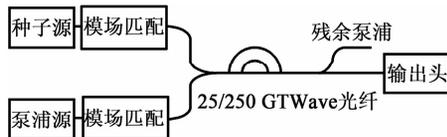


图8 系统结构图

通过控制输入泵浦光功率和种子源信号光的脉冲宽度及功率,在重复频率 10 kHz 的情况下得到了单脉冲能量 2.459 mJ 的脉冲激光输出,测试结果如图 9 所示。

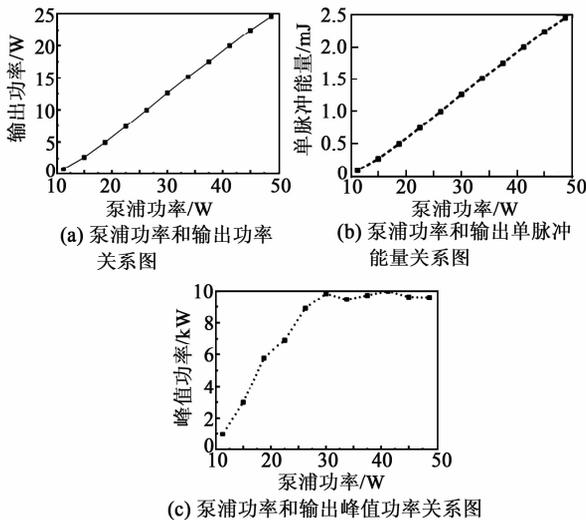


图9 测试结果图

由图 9(a)可看出,输出平均功率随着泵浦功率增加而逐渐增加,GTWave 增益光纤的增益未达到饱和,转化效率为 41%,最后得到了 24.59 W 的功率输出。由图 9(b)可看出,激光器输出的单脉冲能量也随着泵浦功率的增加而增加,趋势和图 9(a)一致,单脉冲能量最高为 2.459 mJ,比传统的 30/250/400 双包层光纤采用侧面熔接式侧面泵浦耦合的方式高 2.4 倍。由图 9(c)可看出,随着泵浦功率的增加,激光器输出的峰值功率先增加,再饱和。饱和峰值功率约为 10 kW。这是由于随着泵浦功率的增

加,激光器的脉冲宽度不断展宽。比较图 9(a)~(c)可知,该光纤的输出功率和单脉冲能量还有提升空间,而峰值功率最大稳定约为 10 kW,可通过提高种子源脉冲宽度及增加注入泵浦的方式来得到高单脉冲能量和高平均功率的脉冲输出。

3 结束语

本文采用中国电科天之星激光技术有限公司控制的 25/250 GTWave 光纤,制作了输出脉冲单脉冲能量 2.459 mJ、峰值功率 10 kW 的脉冲光纤激光器。分析了峰值功率恒定时提高该激光器平均功率和单脉冲能量的方式。对高单脉冲能量脉冲激光器的研制提供了一定的理论和实验基础。

参考文献:

- [1] HIDEUR A, CHARTIER T, ÖZKUL C, et al. All-fiber tunable ytterbium-doped double-clad fiber ring laser [J]. Opt Lett, 2001, 26(14): 1054-1056.
- [2] SELVAS R, SAHU J K, FU L B, et al. High-power, low-noise, Yb-doped, cladding-pumped, three-level fiber sources at 980 nm [J]. Opt Lett, 2003, 28(13): 1093-1095.
- [3] 代守军, 何兵, 周军, 等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702001.
- [4] 赵楠, 李进延. 大模场面积光纤单模运转实现方法的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52: 030002.
- [5] 徐国建, 李宏利, 杭争翔, 等. 6 mm 碳钢板的激光切割性能 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040601.
- [6] SAKAI J, KIMURA T. Bending loss of propagation modes in arbitrary-index profile optical fibers [J]. Appl Opt, 1978, 17(10): 1499-1506.
- [7] LIMPET J, ROSER F, KLINGEBIEL S, et al. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(3): 537-545.
- [8] KOPLow J P, MOORE S W, KLINER D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. IEEE J Quantum Electron, 2003, 39(4): 529-540.
- [9] RIPIN D J, GOLDBERG L. High efficiency side-coupling of light into optical fibers using imbedded v-grooves [J]. Electron Lett, 1996, 31: 2204-2205.
- [10] THEEG T. Pump and signal combiner for bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28125-28141.
- [11] HERDA R, LIEM A, SCHNABEL B, et al. Efficient side-pumping of fiber lasers using binary gold diffraction gratings [J]. Electron Lett, 2003, 39: 276-277.
- [12] HUANG Zhihe, CAO Jianqiu, GUO Shaofeng, et al. The characteristics of pump light in side-coupled cladding-pumped fibers [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19: 293-297.