

千瓦级一体化全光纤激光振荡器

李昊^{1,2}, 李宏业^{1,2}, 李智贤^{1,2}, 田鑫^{1,2}, 王蒙^{1,2,3}, 饶斌裕^{1,2}, 武柏屹^{1,2,3}, 奚小明^{1,2,3}, 陈子伦^{1,2,3}, 王泽锋^{1,2,3*},
陈金宝^{1,2,3}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 基于飞秒激光刻写技术和侧面泵浦耦合技术, 实现了主光路无熔接点的千瓦级一体化全光纤激光振荡器。采用飞秒激光与相位模板结合的刻写方法, 在大模场双包层掺镱光纤上制备了一对光纤光栅, 构成激光谐振腔, 并采用拉锥-熔合法在同一根增益光纤上制备了两个侧面泵浦耦合器。以中心波长为 976 nm 的半导体激光器为泵浦源, 获得了最大功率为 1052 W、中心波长为 1070 nm 的激光输出, 光光转换效率约为 73%, 光束质量因子 M^2 约为 1.8。演示了一种紧凑稳定的一体化光纤激光振荡器系统, 并验证了其在实现高功率、高光束质量激光输出方面的潜力, 其对高功率光纤激光技术的发展与应用具有重要的价值。

关键词 光纤光学; 光纤振荡器; 光纤 Bragg 光栅; 侧面泵浦耦合器; 高功率光纤激光器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2306002

Kilowatt-Level Monolithic All-Fiber Laser Oscillator

Li Hao^{1,2}, Li Hongye^{1,2}, Li Zhixian^{1,2}, Tian Xin^{1,2}, Wang Meng^{1,2,3}, Rao Binyu^{1,2}, Wu Baiyi^{1,2,3},
Xi Xiaoming^{1,2,3}, Chen Zilun^{1,2,3}, Wang Zefeng^{1,2,3*}, Chen Jinbao^{1,2,3}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract Based on the femtosecond laser inscribing technology and side-pump coupling technology, a kilowatt-level monolithic all-fiber laser oscillator without fusion splice in the main optical path is obtained. In addition, a pair of fiber Bragg gratings are written in a large-mode-area and double-cladding ytterbium-doped fiber by combining femtosecond laser and phase mask, so as to form a resonant cavity. Meanwhile, two side-pump couplers are fabricated by tapered-fused technology in the same ytterbium-doped fiber. With a semiconductor laser of 976 nm as the pump source, the maximum output power of 1052 W is obtained at a center wavelength of 1070 nm, and the optical-optical conversion efficiency and the beam quality factor M^2 are about 73% and 1.8, respectively. A compact and stable monolithic fiber laser oscillator system is presented, and its potential in realizing laser output with high power and high beam quality is demonstrated, which is of great value to the development and application of high-power fiber lasers.

Key words fiber optics; fiber oscillator; fiber Bragg grating; side-pump coupler; high-power fiber laser

1 引言

光纤激光器具有光束质量好、热管理方便、柔性传输和紧凑稳定等优点, 被广泛应用于工业、医疗和科研

等领域中^[1]。高功率光纤激光器主要有两种结构, 即放大器结构^[2]和振荡器结构^[3]。近年来, 随着光纤器件的发展和工艺的优化, 光纤振荡器的输出功率得到了极大的提升^[3-8]。2019年, 德国 Laserline 公司报道了一

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-05-26; 录用日期: 2022-06-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11974427, 12004431)、湖南省科技创新人才计划科技创新领军人才项目(2021RC4027)、脉冲功率激光国家重点实验室主任基金项目(SK-2020-ZR05, SK-2021-ZR01)

通信作者: *zefengwang_nudt@163.com

个空间结构光纤振荡器,实现了 17.5 kW 功率的多模输出^[5]。2020 年,日本 Fujikura 公司报道了一个 8 kW 近单模输出的全光纤振荡器^[6]。2021 年,国防科技大学报道的全光纤振荡器也突破了 7 kW 输出功率^[8]。目前,光纤振荡器在输出功率和光束质量方面与光纤放大器的差距逐渐缩小,并且光纤振荡器具有结构紧凑、控制逻辑简单和抗回光反射的优点,故高功率光纤振荡器具有很大的应用价值与发展潜力。

光纤振荡器通常利用光纤熔接技术将有源光纤、光纤泵浦耦合器和光纤 Bragg 光栅 (FBG) 等器件连接起来,但系统中的熔点可能会造成光束质量下降,甚至激发高阶模,从而影响模式不稳定 (TMI) 的阈值。此外,熔点发热也经常成为限制振荡器功率提升的因素之一。为了减小振荡器系统中的熔点个数,避免对信号光纤进行切割与熔接操作,可以直接在有源光纤上刻写 FBG 构成谐振腔^[9-16],或者直接在有源光纤上制备侧面泵浦耦合器^[17-18]。目前已经有一些基于飞秒激光在有源光纤上刻写 FBG 作为振荡器腔镜的报道,但实现千瓦量级功率输出的结果极少^[13, 16]。2019 年,德国耶拿大学在 20/400 μm 双包层掺镱光纤 (YDF) 上刻写了一个高反光纤光栅 (HR-FBG),并将具有菲涅耳反射的 YDF 输出端面作为低反腔镜,获得了功率为 1.9 kW、波长为 1070 nm 的单模激光输出^[13]。次年,德国弗劳恩霍夫激光技术研究所在一根超大模场 YDF 上刻写了一个低反光纤光栅 (OC-FBG) 作为输出腔镜,使用双色镜透过泵浦光并作为高反腔镜,在 1077 nm 波长处实现了 8 kW 功率的多模激光输出^[16]。然而,以上千瓦级光纤振荡器都是空间结构的,系统的稳定性和紧凑性较差。在有源光纤上制备侧面泵浦耦合器的研究也是鲜有报道^[17-18]。2015 年,北京工业大学基于角度磨抛法在双包层 YDF 上制备了 4 个侧面泵浦耦合器,采用多点分布式泵浦的方式实现了 303 W 的功率输出^[17]。2018 年,南方科技大学基于拉锥-熔合法在三包层 YDF 上制备了 4 个侧面泵浦耦合器,实现了 645 W 的功率输出^[18]。这些报道中的侧面泵浦耦合器都是应用在光纤放大器中的,激光器的输出功率都未达到千瓦量级。因此,将飞秒激光刻写 FBG 和侧面泵浦耦合器结合在

一根有源光纤上来构成一体化光纤振荡器,具有重要的研究价值。可以预见,这种一体化振荡器将有效减少熔点数量,增强系统的鲁棒性,并可减小熔点对光束质量与 TMI 阈值的影响。同时,该振荡器还可以大大缩短振荡器主光路的光纤长度,有利于增强系统的紧凑性,并减弱非线性效应。

本文将飞秒激光刻写 FBG 技术与侧面泵浦耦合技术相结合,在一根 20/400 μm 双包层 YDF 中刻写了一对 FBG 来构成谐振腔,同时制备了 2 个侧面泵浦耦合器,实现了主光路无熔点的一体化全光纤振荡器。实验对比分析了腔内和腔外泵浦方式对振荡器系统的影响。通过分布式泵浦实现了 1052 W 的功率输出,中心波长为 1070 nm,3 dB 线宽为 1.22 nm,光光转换效率约为 73%,光束质量因子 M^2 约为 1.8,实验中没有观察到拉曼效应和 TMI 现象。本文展示了一种紧凑稳定的光纤振荡器系统,初步验证了一体化全光纤振荡器具有实现高功率、高光束质量输出的潜力。

2 一体化光纤振荡器制备与实验系统

实验中使用的有源光纤为大模场双包层 YDF,纤芯直径为 20 μm ,内包层直径为 400 μm ,纤芯的数值孔径为 0.062,对 976 nm 波长的泵浦光的吸收系数为 1.23 dB/m。图 1(a) 为基于飞秒激光相位掩模板扫描法刻写 FBG 的示意图。飞秒激光的波长为 515 nm,重复频率为 1 kHz,脉冲能量为 255 μJ 。利用一个焦距为 25 mm 的柱面透镜对光斑直径大约为 3 mm 的飞秒激光进行压缩,以提高焦点处的能量密度。在柱面透镜之后是一块线性啁啾相位掩模板,其啁啾率为 0.5 nm/cm,周期为 1473.8 nm。在 FBG 刻写过程中,利用振镜使聚焦光斑垂直于光纤轴向扫描,以扩大光纤横截面的折射率调制范围。同时,利用电位移平台使聚焦光斑沿光纤轴向移动,以增大栅区的长度。图 1(b) 展示了 HR-FBG 与 OC-FBG 的反射谱。中心波长在 1070 nm 附近,HR-FBG 的长度为 4 cm,其反射率高于 99%,3 dB 带宽大约为 1.2 nm,而 OC-FBG 的长度只有 3 mm,反射率大约为 10%,3 dB 带宽大约为 0.52 nm。

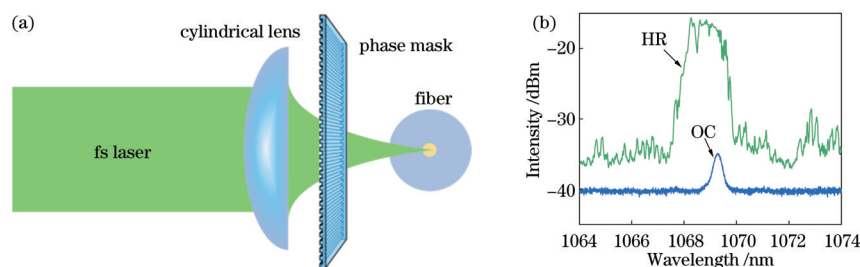


图 1 FBG 的刻写方法和光谱。(a) 基于飞秒激光相位掩模板扫描法刻写 FBG 的示意图;(b) HR-FBG 与 OC-FBG 的反射谱
Fig. 1 Writing method and spectrum of FBG. (a) Schematic diagram of inscribing FBG based on femtosecond laser phase mask scanning method; (b) reflectance spectra of HR-FBG and OC-FBG

图 2 展示了一体化全光纤振荡器的结构示意图。YDF 的总长度为 14.5 m,采取弯曲盘绕的方式紧贴在水冷盘中,最小弯曲半径为 42.5 mm,振荡器前向输出

端与 20/400 μm 无源光纤端帽熔接 (QBH),并且在无源光纤上进行了包层光滤除 (CLS),振荡器反向输出端切斜角以防止端面的菲涅耳反射,谐振腔长度为

13.5 m。泵浦源为中心波长是 976 nm 的半导体激光器(LD),其最大输出功率约为 900 W。基于拉锥-熔合法在 YDF 上制备了两个(1+1)×1 侧面泵浦耦合器,图 2 中的虚线框展示了耦合器的结构示意图。先对 LD 泵浦源输出尾纤(纤芯直径为 220 μm,包层直径为 242 μm)进行拉锥处理,再将 YDF 的一段剥除涂覆层裸露出内包层,最后将拉锥后的尾纤贴合在 YDF 的内包层表面上并进行熔融烧合,使得泵浦光可以耦合进入 YDF 的内包层中。两个耦合器分布在谐振腔内外,与 OC-FBG 之间的增益光纤长度都为 0.5 m,谐振

腔外的耦合器与熔点之间的增益光纤长度为 0.2 m。本实验设计腔内与腔外泵浦的原因主要有两点:一是通过腔内与腔外泵浦探究在增益光纤上刻写的 OC-FBG 在承受泵浦光时温升特性是否会改变;二是通过分布式泵浦的方式缓解热管理压力。与无源光纤上制备的侧面泵浦耦合器相比,在增益光纤上制备的侧面泵浦耦合器的温升特性会叠加增益光纤在泵浦吸收过程中量子亏损引起的热效应,这对侧面泵浦耦合器的温升控制提出了更高的要求。因此,通过两个耦合器分布式泵浦的方式有利于平衡热负荷分布。

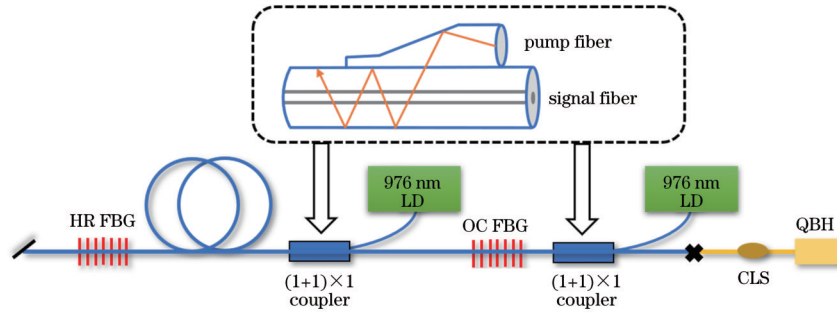


图 2 一体化全光纤振荡器的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of integrated all-fiber oscillator

3 实验结果与分析

图 3 展示了腔外和腔内分别泵浦时,HR-FBG 与 OC-FBG 的温度随正向输出信号光功率的变化,利用红外热像仪对 FBG 的温度进行测量。在相同的正向输出信号光功率下,不论是腔内泵浦还是腔外泵浦的方式,HR-FBG 和 OC-FBG 承受的信号光功率是基本相同的,此时着重比较泵浦光功率对 HR-FBG 和 OC-FBG 温度特性的影响。与腔外泵浦相比,腔内泵浦时,HR-FBG 承受的泵浦光功率更高,OC-FBG 承受的泵浦光功率更小。然而,在图 3 中相同的正向输出信号光功率下,腔内泵浦时,HR-FBG 的温度更高,OC-

FBG 的温度基本不变,这说明泵浦光会造成 HR-FBG 的温度升高,但对 OC-FBG 的温度特性基本没有影响。出现该现象的原因是:与 OC-FBG 相比,HR-FBG 的反射率更高、具有更强的折射率调制深度,并且栅区的长度也 longer,此时在飞秒激光刻写过程中 HR-FBG 形成的色心等吸收缺陷结构的数量更多,更容易吸收泵浦光发热^[19]。从图 3 还可以看出,当输出功率不足 100 W 时,两个 FBG 的温度都已经超过 50 °C,此时仅仅依靠水冷盘主动制冷的方式已经不能满足热管理的需要。因此,在随后的实验中,在水冷盘的表面上覆盖了一层纯净水,让 FBG、YDF 和耦合器与纯净水充分接触,以增强散热效果。

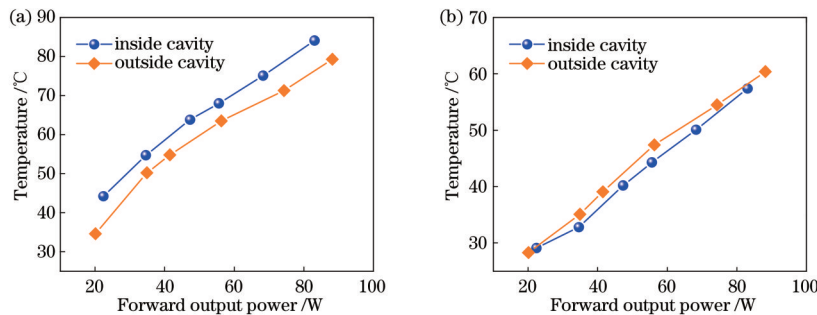


图 3 在腔外和腔内分别泵浦时,HR-FBG 和 OC-FBG 的温度随正向输出信号光功率的变化。(a) HR-FBG;(b) OC-FBG

Fig. 3 Temperature of HR-FBG and OC-FBG varying with optical power of forward output signal when pumping inside or outside cavity, respectively. (a) HR-FBG; (b) OC-FBG

图 4 展示了腔外和腔内分别泵浦时,正向输出功率和反向输出功率随泵浦功率的变化情况。从图 4 (a) 可以看到,腔内与腔外泵浦时的输出功率与斜率效率基本相同,故泵浦方式的变化基本不会对振荡器的

功率与效率产生影响。在图 4(b) 中,随着泵浦功率的增大,反向输出功率增大,并且斜率效率也增大。出现该现象的原因主要有两个。一是 HR-FBG 与 OC-FBG 之间的波长失配会导致反向输出的信号光增多。

在图 3 中可以看到, OC-FBG 的温升系数大约为 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, HR-FBG 的温升系数大约为 $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, 两者的温升系数明显不同, 这意味着随着输出功率的增大, OC-FBG 和 HR-FBG 温升引起的波长漂移量也不同, 进而引起两者光谱间逐渐出现错位, 导致反向输

出信号光功率迅速增大, 反向输出功率斜率增大。二是泵浦光在反向传输过程中未完全转化, 且反向输出端没有包层光滤除器, 此时一部分泵浦光会反向输出, 因此在图 5(b) 的反向光谱中可以看到较强的反向泵浦光谱线。

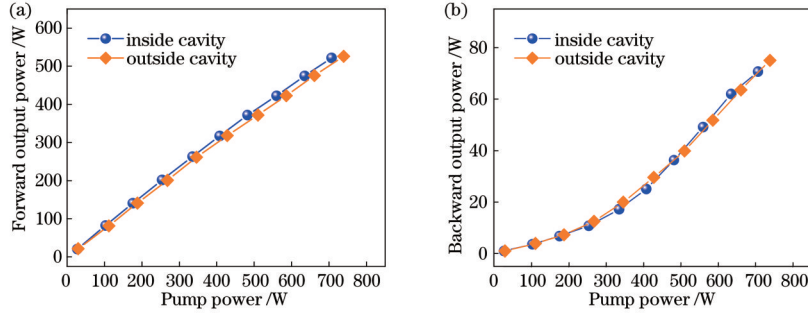


图 4 在腔外和腔内分别泵浦时, 正向输出功率与反向输出功率随泵浦功率的变化。(a) 正向输出功率; (b) 反向输出功率

Fig. 4 Forward output power and backward output power varying with pump power when pumping inside or outside cavity, respectively. (a) Forward output power; (b) backward output power

随后, 使用两个耦合器分布式泵浦实现了最高 1052 W 功率的正向信号光输出, 并测量了振荡器的输出特性。图 5(a) 和图 5(b) 分别展示了不同正向功率下的正向输出光谱和反向输出光谱, 正反向输出光谱背景噪声不同的原因是使用了两台不同的光谱仪进行测量, 但这并不影响测量结果的准确性。在图 5(a) 的正向光谱中, 1070 nm 信号光的光谱随着输出功率的增大而展宽, 造成输出光谱展宽的主要原因是自相位调制和四波混频等非线性效应。最大输出功率下的

3 dB 线宽为 1.22 nm, 没有观察到明显的受激拉曼散射 (SRS) 现象。由于输出端有 CLS 对泵浦光进行滤除, 故正向光谱中没有 976 nm 泵浦光成分。在图 5(b) 的反向光谱中, 观察到了泵浦光成分, 因 LD 泵浦源本身的特性, 其在低功率时波长不稳定, 随着功率的增大而逐渐稳定在 976 nm。当正向功率为 1052 W 时, 反向泵浦光强度与信号光强度相当, 通过光谱积分分析可知, 反向泵浦光与信号光的功率之比大约为 3:7。因此, 反向输出功率中有较多的泵浦光成分。

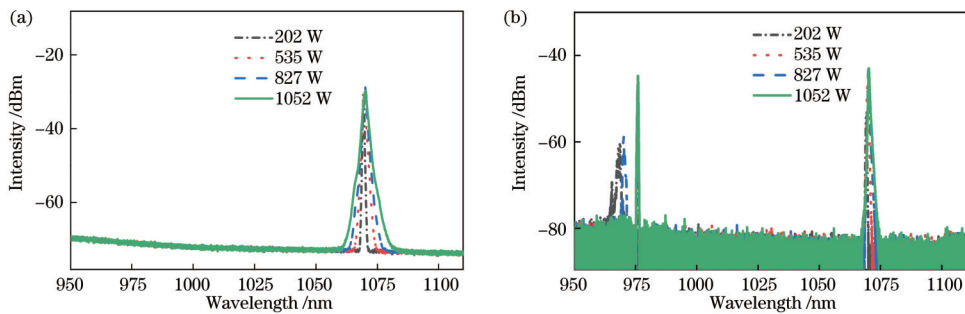


图 5 在两点分布式泵浦时, 不同输出功率下的正向输出光谱和反向输出光谱。(a) 正向输出光谱; (b) 反向输出光谱

Fig. 5 Forward and backward output spectra at different output powers under two-point distributed pumping. (a) Forward output spectrum; (b) backward output spectrum

采取先腔内泵浦后腔外泵浦的顺序, 图 6(a) 和图 6(b) 分别展示了输出功率和光光转换效率随泵浦功率的变化情况。在图 6(a) 中, 正向输出功率基本呈线性增长, 实现了最高 1052 W 的功率输出。由于最大功率下腔内侧面泵浦耦合器的温度非常高, 故考虑到激光器的运行安全, 实验并未测量激光器长时间工作的稳定性。在测量激光器输出光谱和光束质量的较短时间内, 振荡器输出功率稳定, 几乎没有波动。在今后的实验中, 将优化热管理, 并测量一体化光纤激光振荡器长时间工作的稳定性。从图 6(b) 可以看到, 正向输出功率的光光转换效率随着泵浦功率的增大而逐渐减小,

在最大泵浦功率下的光光转换效率约为 73%。由于并未观察到拉曼效应与 TMI 现象产生, 故转换效率下降的主要原因是光栅失配引起反向输出信号光功率增大。

图 7(a) 展示了两个 FBG 与侧面泵浦耦合器在水中的温度变化情况, 温度通过红外观察仪测量。当正向输出功率最大时, HR-FBG 和 OC-FBG 在水中的温度都低于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 谐振腔外的耦合器温度也只是略高于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 处于较安全的温度范围内。然而, 谐振腔内的耦合器温度高达 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其热载荷非常大。这是因为两个侧面泵浦耦合器之间的增益光纤长度比较短 (只有

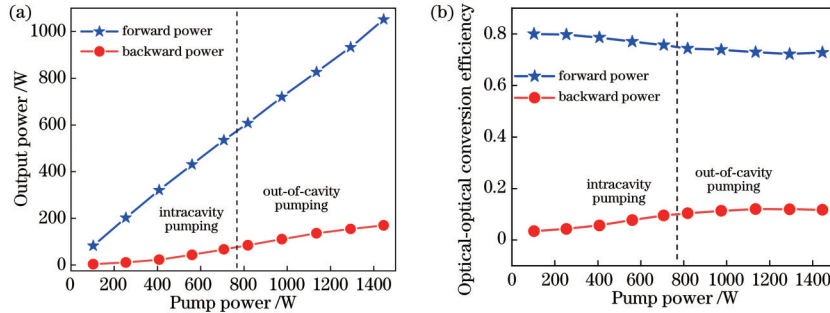


图 6 在两点分布式泵浦时,输出功率与光光转换效率随泵浦功率的变化。(a)输出功率;(b)光光转换效率

Fig. 6 Output power and optical-optical conversion efficiency varying with pump power under two-point distributed pumping.

(a) Output power; (b) optical-optical conversion efficiency

1 m),在腔外耦合器将泵浦光耦合进增益光纤内包层后,泵浦光在 1 m 的长度内只有一小部分转化为信号光,此时腔内耦合器承受了大量的泵浦光。影响耦合器温升特性的一个重要因素是一部分泵浦光会从内包层中泄漏出来,并在涂覆层与内包层交界的剥除面处累积成热量。因此,相比于腔外耦合器,腔内耦合器几乎承受了其两倍的泵浦光,其温升系数也就更大。图

7(b)展示了光束质量的 M^2 因子随正向输出功率的变化情况。随着输出功率的增大, M^2 因子的数值变化并不是很明显,最大功率时 M^2 因子约为 1.8。插图为最大功率下的光斑图像,光斑未出现畸变。一体化光纤振荡器输出光束质量不佳主要是由侧面泵浦耦合器引起的,今后将通过优化其制备工艺进一步优化输出光束质量。

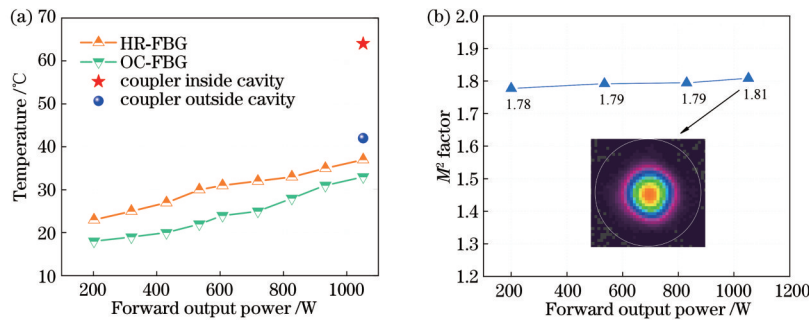


图 7 在两点分布式泵浦时,FBG 与耦合器的温度特性和 M^2 因子随正向输出功率的变化情况。(a) FBG 与耦合器的温度特性;

(b) M^2 因子随正向输出功率的变化情况

Fig. 7 Temperature characteristics of FBGs and couplers and M^2 factor varying with forward output power under two-point distributed pumping. (a) Temperature characteristics of FBGs and couplers; (b) M^2 factor varying with forward output power

4 结 论

将飞秒激光刻写技术与侧面泵浦耦合技术结合,在一根 YDF 上基于飞秒激光相位掩模板扫描法刻写了一对 FBG 构成谐振腔,并采用拉锥-熔合法制备了两个侧面泵浦耦合器,从而实现了一种主光路无熔点的一体化全光纤激光振荡器。使用中心波长为 967 nm 的 LD 作为泵浦源,通过分布式泵浦的方式,在 1070 nm 波长处实现了 1052 W 的功率输出,光光转换效率约为 73%,光束质量因子 M^2 约为 1.8。今后将进一步研究在 YDF 上制备光纤端帽与包层光滤波器、优化 FBG 与侧面泵浦耦合器的性能,进而实现更加紧凑、更大功率、更高效率和更优光束质量的一体化全光纤振荡器。此外,高功率、高脉冲能量的脉冲激光在精细材料加工、生物医疗等领域中有广泛的应用^[20-21],故实现一体化全光纤脉冲激光振荡器也是一个重要的发展方向。

参 考 文 献

- [1] 周朴,冷进勇,肖虎,等.高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J].中国激光,2021,48(20):2000001.
Zhou P, Leng J Y, Xiao H, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2000001.
- [2] 陈晓龙,何宇,徐中巍,等.10 kW 高效率 1070 nm 光纤放大器的理论与实验研究[J].中国激光,2020,47(10):1006001.
Chen X L, He Y, Xu Z W, et al. Theoretical and experimental investigation of a 10-kW high-efficiency 1070-nm fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1006001.
- [3] 张汉伟,王小林,杨保来,等.输出功率突破 3 kW 的全光纤激光振荡器[J].中国激光,2017,44(4):0415001.
Zhang H W, Wang X L, Yang B L, et al. All-fiber laser oscillator with output power exceeding 3 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0415001.

- [4] 许阳, 房强, 谢兆鑫, 等. 基于 915 nm 半导体激光单端前向抽运的单纤准单模 2 kW 全光纤激光振荡器[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401003.
Xu Y, Fang Q, Xie Z X, et al. Single fiber quasi-single mode 2 kW all-fiber laser oscillator based on single-end 915 nm semiconductor laser forward-pumping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401003.
- [5] Ackermann M, Rehmann G, Lange R, et al. Extraction of more than 10 kW from a single ytterbium-doped MM-fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10897: 1089717.
- [6] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 1126022.
- [7] Yang B L, Wang P, Zhang H W, et al. 6 kW single mode monolithic fiber laser enabled by effective mitigation of the transverse mode instability[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 26366-26374.
- [8] 奚小明, 王鹏, 杨保来, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破 7 kW[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0116001.
Xi X M, Wang P, Yang B L, et al. The output power of all-fiber laser oscillator breaks through 7 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0116001.
- [9] Jovanovic N, Aslund M, Fuerbach A, et al. Narrow linewidth, 100 W cw Yb³⁺-doped silica fiber laser with a point-by-point Bragg grating inscribed directly into the active core[J]. Optics Letters, 2007, 32(19): 2804-2806.
- [10] Krämer R G, Liem A, Voigtländer C, et al. 514 W monolithic fiber laser with a femtosecond inscribed fiber Bragg grating[C]//The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2013, May 12-16, 2013, Munich, Germany. Washington, D.C.: OSA, 2013: CJ_1_3.
- [11] Bharathan G, Woodward R I, Ams M, et al. Direct inscription of Bragg gratings into coated fluoride fibers for widely tunable and robust mid-infrared lasers[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30013-30019.
- [12] Fortin V, Jobin F, Larose M, et al. 10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 491-494.
- [13] Krämer R G, Matzdorf C, Liem A, et al. Femtosecond written fiber Bragg gratings in ytterbium-doped fibers for fiber lasers in the kilowatt regime[J]. Optics Letters, 2019, 44(4): 723-726.
- [14] Theodosiou A, Aubrecht J, Kašik I, et al. Femtosecond laser plane-by-plane inscribed cavity mirrors for monolithic fiber lasers in thulium-doped fiber[J]. Sensors, 2021, 21(6): 1928.
- [15] Huang Z N, Huang Q Q, Theodosiou A, et al. Femtosecond laser direct inscribed 45° tilted fiber grating for a net-normal-dispersion mode-locked Er-doped fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107358.
- [16] Klein S, Giesberts M, Baer P, et al. Fiber Bragg gratings in active multimode XLMA fibers for high-power kW-class fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 1126025.
- [17] 董繁龙, 葛廷武, 张雪霞, 等. 300 W 侧面分布式抽运掺 Yb 全光纤放大器[J]. 物理学报, 2015, 64(8): 084205.
Dong F L, Ge T W, Zhang X X, et al. 300 W all-fiber amplifier with distributed side-coupled pump configuration [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(8): 084205.
- [18] Dong F L, Zhang X H, Song F. Side coupler applied in a multi-pumped Yb-doped triple-clad fiber laser[J]. Laser Physics, 2018, 28(12): 125106.
- [19] Krämer R G, Möller F, Matzdorf C, et al. Extremely robust femtosecond written fiber Bragg gratings for an ytterbium-doped fiber oscillator with 5 kW output power [J]. Optics Letters, 2020, 45(6): 1447-1450.
- [20] Tang Y L, Yu X C, Li X H, et al. High-power thulium fiber laser Q switched with single-layer graphene[J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 614-617.
- [21] Li X H, Yu X C, Sun Z P, et al. High-power graphene mode-locked Tm/Ho co-doped fiber laser with evanescent field interaction[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 16624.