

文章编号: 1000-7032(2024)07-1181-08

基于对称光纤模式选择耦合器的多波长高阶横模光纤激光器

吕 鑫¹, 王 帆¹, 苗云宁¹, 任文华^{1*}, 郭 颖²

(1. 北京交通大学 光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044;
2. 中原工学院 物理与光电工程学院, 郑州低维量子材料与器件重点实验室, 河南 郑州 450007)

摘要: 提出并实现了一种基于对称光纤模式选择耦合器和单模-少模-单模光纤滤波器的环形腔高阶横模光纤激光器, 获得了多波长、高纯度的LP₁₁模式激光输出。实验结果表明, 该激光器可以稳定地工作在单波长、双波长、三波长和四波长状态, 对应的LP₁₁模式激光纯度分别为97.60%、97.54%、97.34%和97.19%。对称光纤模式选择耦合器制造工艺简单, 性能稳定, 为高阶横模光纤激光的获得提供了一种新的可选方案, 在光通信、光传感等领域具有潜在的应用价值。

关键词: 对称光纤模式选择耦合器; 单模-少模-单模光纤滤波器; 多波长; 高阶横模
中图分类号: TN248 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20240077

Multi-wavelength High-order Mode Fiber Laser Based on Symmetrical Fiber Mode Selective Coupler

LYU Xin¹, WANG Fan¹, MIAO Yunning¹, REN Wenhua^{1*}, GUO Ying²

(1. Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Zhengzhou Key Laboratory of Low-dimensional Quantum Materials and Devices, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)
* Corresponding Author, E-mail: whren@bjtu.edu.cn

Abstract: A multi-wavelength ring cavity high-order mode fiber laser based on a symmetrical fiber mode selective coupler (MSC) and single mode-few mode-single mode fiber filter was demonstrated and verified in this paper. The experimental result reveals that the proposed laser can operate stably in single-, dual-, triple- and quadruple-wavelength states with LP₁₁ mode output, whose purities are 97.60%, 97.54%, 97.34% and 97.19%, respectively. The symmetrical fiber MSC is easy to be fabricated and stable, providing a new choice for the high-order mode fiber laser, which has potential applications in optical communications, optical sensing, etc.

Key words: symmetrical fiber mode selective coupler; single mode-few mode-single mode fiber filter; multi-wavelength; high-order mode

1 引 言

近年来, 高阶横模光纤激光器因其在光通信^[1-4]、光传感^[5]、光镊^[6-7]、材料加工^[8]、表面等离子体

激发^[9-10]等领域的广泛应用而备受关注。通常, 高阶横模光纤激光器中需要使用模式选择或转换器件来获得所需要的高阶横模, 如长周期光纤光栅^[11]、少模光纤布拉格光栅^[12-13]、模式选择耦合器

收稿日期: 2024-03-20; 修订日期: 2024-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(62075008); 河南省科技攻关项目(232102210176)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62075008); Key Scientific and Technological Project of Henan Province (232102210176)

(MSC, Mode selective coupler)^[14-17]等。与其他光纤模式选择/转换器件相比,光纤 MSC 工作带宽大,适合用来制作宽带可调谐或多波长高阶横模光纤激光器。

2020年, Ren 等利用 Sagnac 滤波器和级联光纤 MSC 制作了模式可切换的多波长高阶横模光纤激光器,实现了 LP₁₁、LP₂₁ 和 LP₀₂ 模式的单波长、双波长和三波长激光输出^[14]。同年, Tang 等利用双 Sagnac 滤波器和光纤 MSC 制作了多波长高阶横模光纤激光器,实现了 LP₁₁ 模式的 6 波长激光输出,模式纯度高于 95%^[15]。2023 年, Shi 等设计并制作了一种双通道光纤 MSC,将其应用于光纤激光器中,可以在 1 060 nm、1 550 nm 波段同时产生涡旋激光光束^[16]。同年, Wu 等制作了一种耗散孤子共振光纤激光器,利用高非线性光纤(HNLF, Highly nonlinear fiber)和光纤 MSC,实验获得了 1 650 nm 的柱矢量光束和涡旋光束^[17]。上述工作中使用的都是传统的光纤 MSC,这种 MSC 由一根单模光纤(SMF, Single mode fiber)和一根少模光纤(FMF, Few mode fiber)通过熔融拉锥法或研磨法制成。为了实现 SMF 中的基模向 FMF 中特定高阶横模的高效转换,需要对耦合区域中 SMF、FMF 的直径、长度进行精确控制,通常还需要对其中一根光纤进行预拉锥,制作难度大,效率较低。

2019 年, Xu 等利用两根相同的双模光纤,通过熔融拉锥法制成少模光纤耦合器,通过合理控制耦合区的长度,实现了 LP₁₁ 模式的选择性输出。他们将其应用于环形腔光纤激光器中,实验获得了高纯度(>91%)的柱矢量光束激光输出(TE₀₁、TM₀₁)^[18]。2022 年, Lu 等同样使用自制的双模光纤耦合器作为模式选择器件,得到了可以双向输出柱矢量光束的光纤激光器^[19]。这种基于两根相同的少模光纤制成的少模光纤耦合器,同样可以实现特定高阶横模的选择性输出,因此可以称为对称型光纤 MSC。

在这种对称型光纤 MSC 中,两根 FMF 中的同一模式天然满足相位匹配条件,且不同模式具有不同的耦合长度,通过精确控制耦合区的长度就可以实现特定模式功率的高效耦合,制作难度大为降低。

本文同样采用熔融拉锥法,使用两根完全相同的四模光纤制作对称光纤 MSC,在制作过程中

精确控制耦合区长度,以确保可以实现 LP₁₁ 模式的选择性输出。在输入端使用 SMF 和四模光纤进行偏芯熔接,以确保可以有效激发出 LP₁₁ 模式。结合优化设计的具有高消光比的单模-少模-单模(SFS, SMF-FMF-SMF)光纤滤波器,最终实现了一种多波长高阶横模光纤激光器,该激光器可以稳定输出单、双、三、四波长的 LP₁₁ 模式激光,相应的模式纯度分别为 97.60%、97.54%、97.34% 和 97.19%。

2 实验装置和原理

2.1 SFS 光纤滤波器的设计和制作

图 1 为 SFS 光纤滤波器的结构示意图,该 SFS 光纤滤波器由两段 SMF(Corning: SMF28, 纤芯折射率 $n_{co}=1.449$, 包层折射率 $n_{cl}=1.444$, 纤芯半径 $a=4.1 \mu\text{m}$)和熔接在它们中间的一段 FMF 构成(YOFC: ULL, $n_{co}=1.44402$, $n_{cl}=1.43939$, $a=11 \mu\text{m}$, 四模光纤@1 550 nm, 长度 $L=1.8 \text{ m}$), SMF 和 FMF 之间偏芯 10 μm 熔接在一起,两个熔接点的偏芯距离一致。当光从一端的 SMF 输入后,在第一个偏芯熔接点(OSS, Offset-splice spot)处, SMF 中基模的功率将耦合到 FMF 中的基模和高阶模;不同模式承载的光功率在 FMF 中独立传输,由于不同模式的传输常数不同,各路之间将会产生相位差;在第二个 OSS 处,不同模式承载的光功率又将耦合回 SMF 中的基模,由于前述多路之间的相位差,此时将会在第二个 OSS 处产生多路干涉,这就形成了 SFS 光纤滤波器。

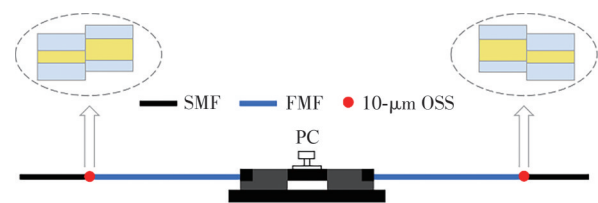


图 1 SFS 光纤滤波器的结构示意图

Fig. 1 The structure of the SFS fiber filter

SFS 光纤滤波器的透射谱可以表示为:

$$I = \left| \sum_{m=1}^N \sqrt{I_m} \exp(i\beta_m L) \right|^2 = \sum_{m=1}^N I_m + 2 \sum_{m=2}^N \sum_{k=1}^{m-1} \sqrt{I_m I_k} \cos[k_0(n_{\text{eff},m} - n_{\text{eff},k})L], \quad (1)$$

其中 L 是 FMF 的长度, N 是 FMF 中被激发的模式总数, I_m ($m=1, 2, \dots, N$) 是其中第 m 个模式的光强度, β_m 、 $n_{\text{eff},m}$ 分别是第 m 个模式的传输常数和有效折射率, k_0 是真空中波数。

从公式(1)可以看出,SFS 光纤滤波器的透射谱是 $N(N-1)/2$ 个双模干涉谱之和,所以对应有 $N(N-1)/2$ 个不同的自由光谱范围(FSR,Free spectral range,公式中用 R_{FS} 表示)。透射谱中第 m 个模式和第 k 个模式干涉引起的相邻干涉峰之间的间隔表示为:

$$R_{FS, mk} = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff, mk} L} = \frac{\lambda^2}{|n_{eff, m} - n_{eff, k}| L}. \quad (2)$$

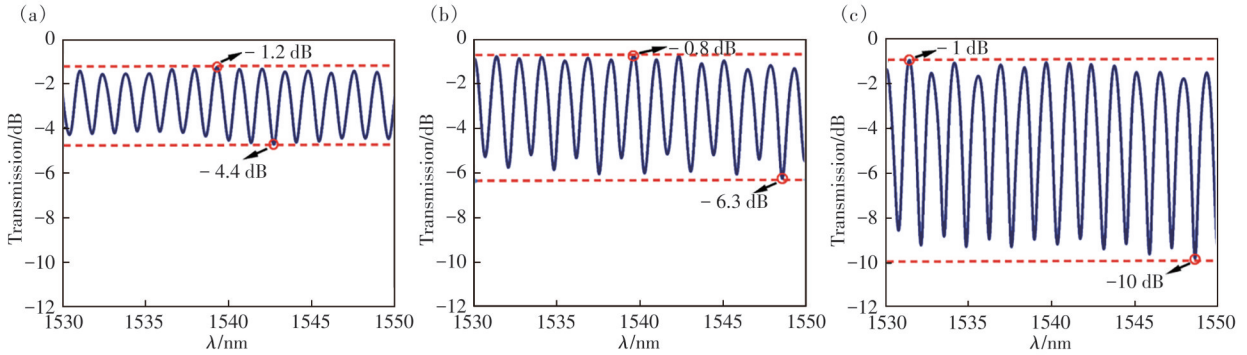


图 2 调整加载在 FMF 上的 PC 时,SFS 光纤滤波器的透射谱的变化

Fig. 2 The measured transmission spectra of the SFS fiber filter under different PC states

从图 2 还可以看出,所制作的 SFS 光纤滤波器的透射谱的 FSR 约为 1.38 nm,并且在较大波长范围内均匀分布,这意味着在 FMF 中主要有两种模式被激发出来。根据公式(2),可以计算出相应的两个模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 大约为 0.000 96。对实验中所使用的 FMF 进行建模,利用有限元法求得其中四种模式 (LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 和 LP_{02}) 的有效折射率以及相邻两个模式之间的有效折射率差,如表 1 所示。

表 1 FMF 中四种模式 (LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 和 LP_{02}) 的有效折射率以及相邻两个模式之间的有效折射率差

Tab. 1 The effective refractive indices of four modes (LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} and LP_{02}) in the FMF and differences of effective refractive indices between adjacent modes

模式	n_{eff}	Δn_{eff}
LP_{01}	1.443 20	
LP_{11}	1.442 27	0.000 93
LP_{21}	1.440 93	0.001 34
LP_{02}	1.440 54	0.000 39

从表 1 可以看出, LP_{01} 模和 LP_{11} 模之间的有效折射率差为 0.000 93,与实验结果计算得出的 0.000 96 相差很小,所以可以认为所制作的 SFS 光纤滤波器主要激发出了 LP_{01} 模和 LP_{11} 模。

图 2 中,调节加载在 SFS 上的 PC,导致 SFS 光纤滤波器的消光比发生变化的原因是,制作 SFS

实验中,还在所制作的 SFS 光纤滤波器的 FMF 上增加了偏振控制器(PC,Polarization controller)来调节其中的偏振态,以达到更好的滤波效果。图 2(a)~(c)显示了通过调整 PC 所得到的 SFS 光纤滤波器的不同透射谱。由图中可知,通过调节 PC,该 SFS 光纤滤波器的插入损耗可在 0.8~1.2 dB 之间变化,消光比可在 3.2~9 dB 之间变化。

光纤滤波器时,两个焊接点位置的相对关系,包括偏芯距离、旋转角度,都会影响所制作的 SFS 光纤滤波器的消光比。对于最简单的双模干涉的情况,存在一个最佳旋转角度,使得 SFS 光纤滤波器的消光比达到最大值^[20]。本文中,调节加载在 FMF 上的挤压式 PC 时,会导致 FMF 中 LP_{11} 模式的对称轴角度发生旋转,从而使得所制作的 SFS 光纤滤波器的消光比发生变化。

进一步地,按照最高 9 dB 的消光比计算,本文所制作的 FMF 中被激发的 LP_{01} 、 LP_{11} 模式的功率比值大约为 0.677:0.323。

2.2 对称光纤 MSC 的制作

图 3 为对称光纤 MSC 的结构示意图。在制作过程中,首先根据制作上述 SFS 光纤滤波器的经验,以大约 10 μm 的纤芯偏移量熔接 SMF 和 FMF1,来保证输入激光可以在 FMF 中激发出足够功率的 LP_{01} 、 LP_{11} 模,但基本不会激发出 LP_{21} 、 LP_{02} 模;然后,将 FMF1 与另一根相同参数的 FMF2 缠绕到一起,进行熔融拉锥;在拉锥过程中,在 FMF2 的输出端口 3(Port3)处,使用 CCD 进行实时观测;当观测到明显的 LP_{11} 模式输出时,即停止拉锥过程;最后,为了使 MSC 能够插入激光腔作为模式选择器件,在 FMF1 的输出端口 2(Port2)芯对芯地熔接了一段 SMF。

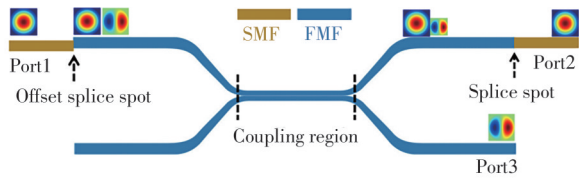


图 3 对称光纤 MSC 结构示意图

Fig. 3 The structure of the symmetric fiber MSC

为了更好地阐明对称光纤 MSC 的工作机理,图 4 给出了 FMF 中 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模的有效折射率随 FMF 半径的变化情况。当锥区直径减小到一定程度时,就需要考虑光纤周围空气的影响,所以在仿真模型中加入了折射率为 1 的空气包层。当模式的有效折射率大于包层折射率 1.439 39 时,表明该直径下的光纤依然可以对该模式光场提供足够好的束缚,此时两根光纤之间相应模式的耦合系数很小,耦合发生得很慢,相应的耦合长度较长;当模式的有效折射率小于包层折射率 1.439 39 时,表明此时该模式的能量完全扩散到了包层中,该直径下的光纤不能对该模式光场提供足够好的束缚,此时两根光纤之间相应模式的耦合系数很大,耦合发生得很快,相应的耦合长度较短^[21]。

由图 4 可知,LP₀₁ 和 LP₁₁ 模的有效折射率为 1.439 39 时,对应的 FMF 半径分别为大约 12.5 μm 和 30 μm,所以当单根光纤的锥区直径控制在 25~60 μm 之间时,LP₁₁ 模式的耦合长度将明显小于 LP₀₁ 模式的耦合长度。此时,通过合理控制耦合

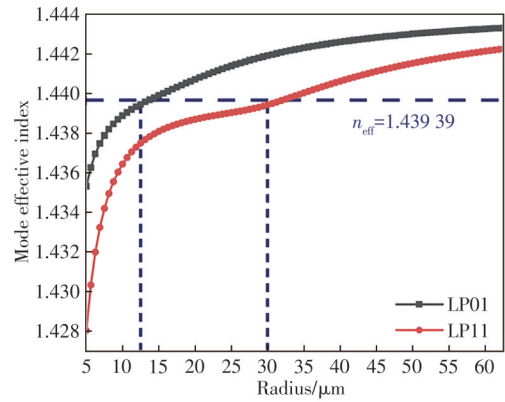


图 4 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模的有效折射率随 FMF 半径的变化

Fig. 4 The effective indices of the LP₀₁ and LP₁₁ modes versus the FMF radius

区的长度,即可实现 LP₁₁ 模式的高效耦合和高纯度输出。

为了验证上述分析,还使用 Rsoft 软件进行了模拟仿真。所使用的仿真参数如下:纤芯折射率 1.444 02,包层折射率 1.439 39,环境折射率 1,两个纤芯直径均为 4.576 μm,芯间距 26 μm,总的包层直径 52 μm(单根光纤包层直径为 26 μm)。仿真结果如图 5 所示,将 LP₀₁ 模式从左边的光纤输入,得到如图 5(a)、(b)所示的 LP₀₁ 模式在锥腰部分的二维模场分布图。从图中可以看出,左边光纤中的 LP₀₁ 模式能量没有耦合到右边光纤中。同理将 LP₁₁ 模式从左边的光纤输入,得到如图 5(c)、(d)所示的 LP₁₁ 模式在锥腰部分的二维模场分布图。显然,左边光

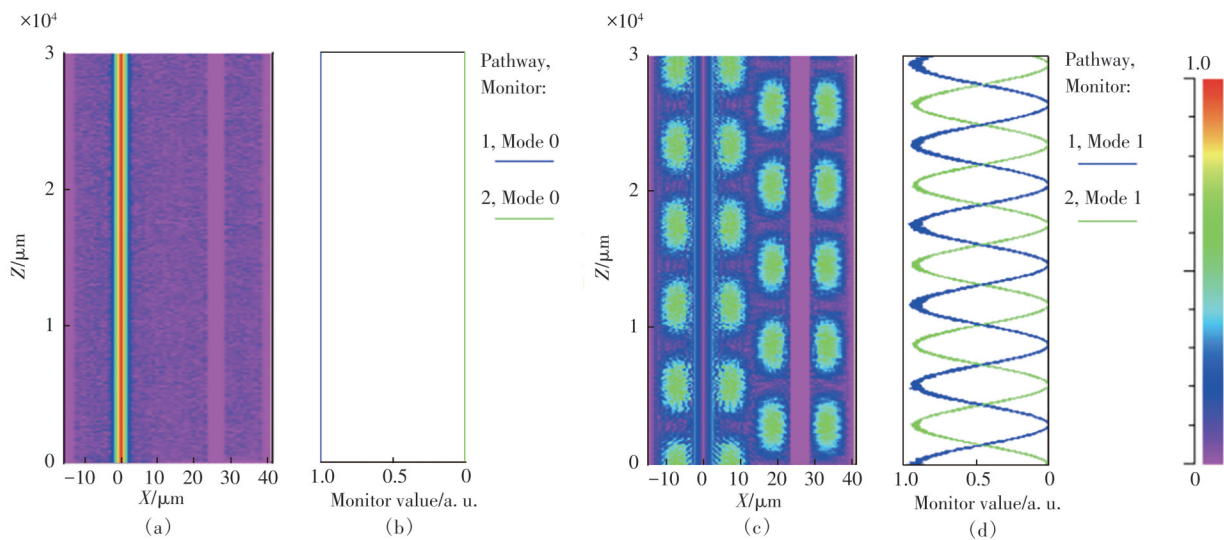


图 5 LP₀₁ 模在锥腰部分的二维模场分布图:(a)能量流动,(b)功率交换;LP₁₁ 模在锥腰部分的二维模场分布图:(c)能量流动,(d)功率交换

Fig. 5 The energy flow (a) and power exchange(b) of LP₀₁ mode on the XZ plane of the coupling region. The energy flow(c) and power exchange(d) of LP₁₁ mode on the XZ plane of the coupling region

纤中的 LP_{11} 模式能量很快都耦合到了右边光纤中,能量在两根光纤中交替传输,这与上述对图4的分析相符。

2.3 激光器的搭建

本文所提出的多波长高阶横模光纤激光器实验装置如图6所示。980 nm泵浦激光器作为泵浦源,通过980/1550 nm的WDM接入环形腔中;一段5 m长、在1530 nm波长处吸收系数为5.42 dB/m的EDF(Fibercore: M5)作为增益介质;所制作的SFS光纤滤波器形成梳状滤波谱,用于提供多波长通道;140 m长的HNLf(YOFC: NL 1550-Zero)用来产生四波混频效应,从而抑制EDF中均匀展宽效应引起的模式竞争,该HNLf的非线性系数为 $12 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$;偏振控制器PC1与PC2用于调整激光腔内光束的偏振状态,产生不同的偏振相关损耗,进而实现不同的波长激射^[22];在单模光纤耦合器(OC)输出端口1使用光谱分析仪(Thorlabs: OSA203C)对输出激光进行观测和记录,在MSC的输出端口2使用CCD(Dataray: BladeCam2-HR-TEL)对输出激光的光斑进行观测和记录。

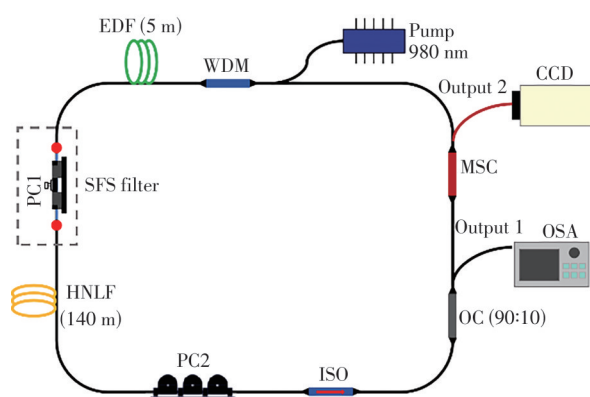


图6 多波长高阶横模光纤激光器的实验装置。其中, Pump 980 nm: 980 nm泵浦激光器, WDM: 波分复用器, EDF: 掺铒光纤, HNLf: 高非线性光纤, ISO: 光隔离器, OC: 光耦合器, OSA: 光谱分析仪, CCD: CCD相机

Fig. 6 The experimental setup of the multi-wavelength high-order-mode fiber laser. Pump 980 nm: 980 nm pump laser, WDM: wavelength division multiplex, EDF: Er-doped fiber, HNLf: highly nonlinear fiber, ISO: isolator, OC: optical coupler, OSA: optical spectrum analyzer, CCD: CCD camera

3 结果与讨论

实验中,泵浦激光器的功率保持在300 mW,

通过PC1、PC2的联调,获得了信噪比约为40 dB的单波长、双波长、三波长和四波长激光输出。为了测试输出激光的稳定性,每6 min采集一次输出激光光谱,共持续了30 min。测得的单波长、双波长、三波长和四波长输出激光光谱分别如图7(a)~(d)所示,相应的中心波长和峰值功率统计在图7(e)~(h)中。实验结果表明,单波长、双波长、三波长和四波长输出激光光谱的中心波长漂移分别低于0.03 nm、0.06 nm、0.07 nm和0.11 nm,对应的功率变化分别低于0.09 dB、0.51 dB、0.69 dB和0.87 dB,显示了该激光器良好的波长和功率稳定性。

输出端口2所获得的输出激光光斑如图8所示。图8(a)~(c)分别给出了所获得的 LP_{11} 模式激光在单波长(1530.19 nm)时的二维、三维场强分布图和相应的光谱,图8(d)~(f)分别给出了所获得的 LP_{11} 模式激光在双波长(1529.97 nm和1532.53 nm)时的二维、三维场强分布图和相应的光谱,图8(g)~(i)分别给出了所获得的 LP_{11} 模式激光在三波长(1529.97 nm、1531.32 nm和1532.5 nm)时的二维、三维场强分布图和相应的光谱,图8(j)~(l)分别给出了所获得的 LP_{11} 模式激光在四波长(1528.36 nm、1529.97 nm、1531.18 nm和1532.59 nm)时的二维、三维场强分布图和相应的光谱。

从图8中可以直观地看出,所获得的 LP_{11} 模式激光具有很高的模式纯度。根据光场强度比较法进行计算^[23-24],当激光器工作在单波长、双波长、三波长和四波长输出状态时,所获得的 LP_{11} 模式激光的纯度分别为97.60%、97.54%、97.34%和97.19%。

需要说明的是,由于实验中是使用四模光纤来制作对称光纤MSC,理论上输出激光中不可避免地会存在少量 LP_{21} 、 LP_{02} 模式激光成分。但本文在计算输出激光的模式纯度时,为了简化问题分析,只考虑了 LP_{01} 模式激光的影响,未考虑 LP_{21} 、 LP_{02} 模式激光的影响。这是因为,一方面,在MSC的制作过程中,已经通过精确控制偏芯熔接距离、控制耦合区长度等措施来尽力避免 LP_{21} 、 LP_{02} 模式激光的产生;另一方面,在输出端,通过简单地弯曲输出光纤,进一步降低甚至消除了输出激光中的 LP_{21} 、 LP_{02} 这些高阶模式成分。

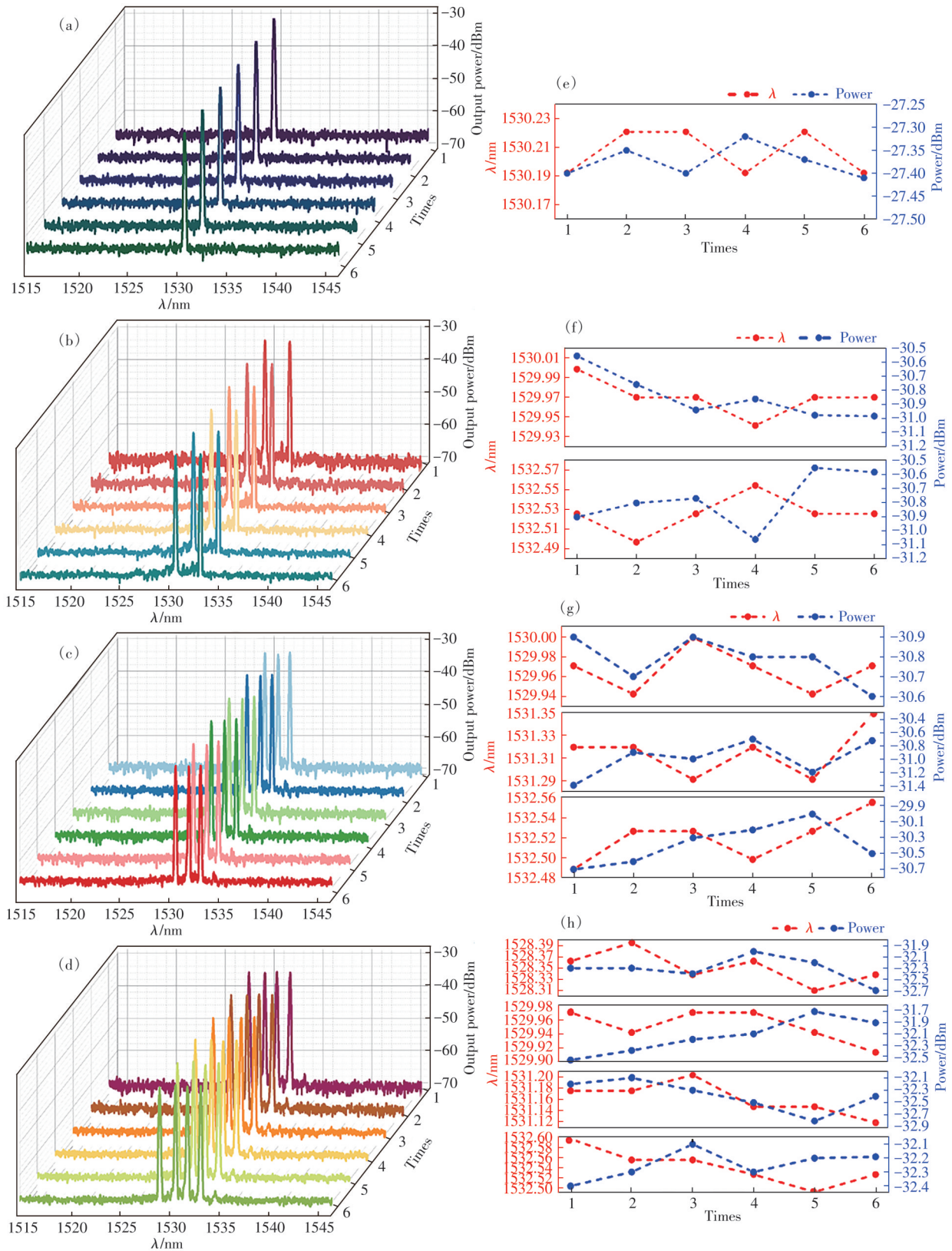


图 7 (a)~(d)30 min 内测量的单波长、双波长、三波长和四波长输出激光光谱,时间间隔为 6 min;(e)~(h)相应的中心波长(红点)和功率(蓝点)

Fig. 7 (a)~(d)The measured output spectra of the single-, dual-, triple- and quadruple- wavelength laser with a time interval of 6 minutes in half an hour. (e)~(h)The corresponding central wavelengths and powers(red and blue points, respectively)

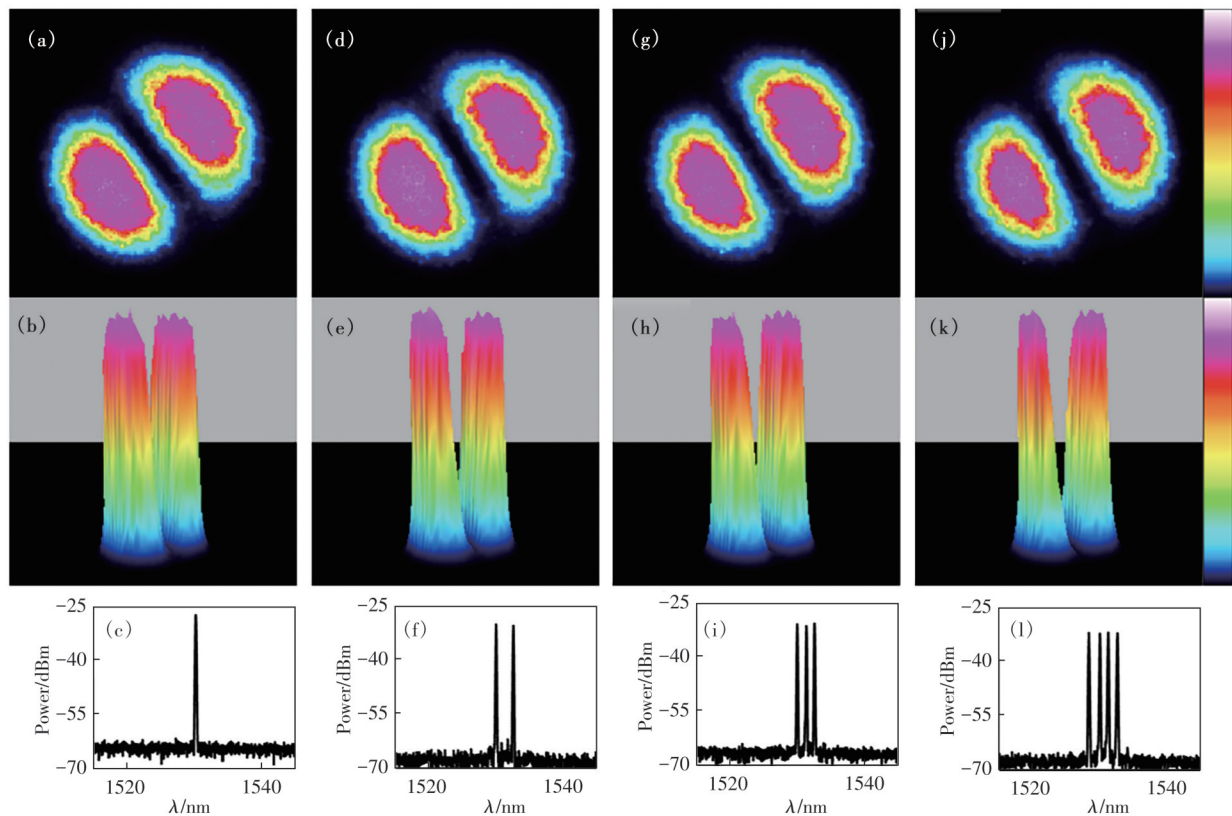


图8 获得的 LP_{11} 模式激光的二维、三维场强分布图和相应的光谱。(a)~(c)单波长;(d)~(f)双波长;(g)~(i)三波长;(j)~(l)四波长

Fig. 8 The plane and three-dimensional field intensity patterns of the output LP_{11} modes laser and the corresponding output spectrum. (a)~(c)Single-wavelength state. (d)~(f)Dual-wavelength state. (g)~(i)Triple-wavelength state. (j)~(l)Quadruple-wavelength state

4 结 论

本文提出并实现了一种以对称光纤 MSC 作为模式选择器件、SFS 光纤滤波器作为波长选择器件的环形腔高阶横模光纤激光器,获得了稳定的单、双、三、四波长的 LP_{11} 模式激光输出,经测量模式纯度分别为 97.60%、97.54%、97.34% 和 97.19%。所研制的 SFS 光纤滤波器和对称光纤

MSC 均采用商用光纤和标准工艺制成,技术成熟,易于制造。基于该方案,未来可以研制出更高阶模式、更多波长、更高稳定性的高阶横模光纤激光器,为光通信、光传感等领域提供高质量的光源。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240077>.

参 考 文 献:

- [1] BOZINOVIC N, YUE Y, REN Y X, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers [J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [2] WINZER P J. Energy-efficient optical transport capacity scaling through spatial multiplexing [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2011, 23(13): 851-853.
- [3] 古皓, 汤敏, 曹敏, 等. 基于环形芯光纤的超低差分模式增益涡旋光纤放大器 [J]. *发光学报*, 2020, 41(1): 55-62.
 GU H, TANG M, CAO M, *et al.* Vortex fiber amplifier with ultra-low differential mode gain based on ring core fiber [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(1): 55-62. (in Chinese)
- [4] 赵新月, 邱强, 褚应波, 等. 少模掺铒光纤及其放大器研究进展 [J]. *发光学报*, 2022, 43(12): 1915-1927.

- ZHAO X Y, QIU Q, CHU Y B, *et al.* Research progress on few-mode Erbium-doped fiber and its corresponding amplifier [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(12): 1915-1927. (in Chinese)
- [5] MILIONE G, WANG T, HAN J, *et al.* Remotely sensing an object's rotational orientation using the orbital angular momentum of light (invited paper) [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2017, 15(3): 030012.
- [6] CURTIS J E, GRIER D G. Modulated optical vortices [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(11): 872-874.
- [7] MORADI H, SHAHABADI V, MADADI E, *et al.* Efficient optical trapping with cylindrical vector beams [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(5): 7266-7276.
- [8] MEIER M, ROMANO V, FEURER T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation [J]. *Appl. Phys. A*, 2007, 86(3): 329-334.
- [9] CHEN W B, ZHAN Q W. Realization of an evanescent Bessel beam *via* surface plasmon interference excited by a radially polarized beam [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(6): 722-724.
- [10] DONG Y X, XI S X, ZHU B W, *et al.* The directional excitation of surface plasmon polaritons by radially polarized beam with multiple off-axis vortices [J]. *Opt. Commun.*, 2019, 443: 197-201.
- [11] JIANG Y C, TANG M, YAO S Z, *et al.* Switchable single-longitudinal-mode narrow linewidth fiber laser with cylindrical vector beam output [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 153: 108213.
- [12] LIU T, CHEN S P, HOU J. Selective transverse mode operation of an all-fiber laser with a mode-selective fiber Bragg grating pair [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(24): 5692-5695.
- [13] SONG J X, XU H Y, WU H S, *et al.* High power narrow linewidth LP₁₁ mode fiber laser using mode-selective FBGs [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2018, 15(11): 115101.
- [14] REN F, ZHANG Y Y, ZHANG J Y, *et al.* Switchable multi-wavelength linearly-polarized lasing oscillations in a figure eight EDF laser based on spatial-mode beating by means of weakly-coupled FMF [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2020, 128: 106259.
- [15] TANG M, JIANG Y C, LI H S, *et al.* Multi-wavelength fiber laser based on dual-Sagnac comb filter for LP₁₁ modes output [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2020, 38(14): 3745-3750.
- [16] SHI F, HOU M D, WANG W, *et al.* Direct emission of two-color vortex beams at 1.0 μm and 1.5 μm wavebands from an all-fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2023, 35(9): 473-476.
- [17] WU J D, LAI Z, ZHOU Y, *et al.* High energy singular beams generation from a dissipative soliton resonance Raman fiber laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2023, 41(15): 5091-5096.
- [18] XU Y, CHEN S, WANG Z Q, *et al.* Cylindrical vector beam fiber laser with a symmetric two-mode fiber coupler [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(12): 1479-1484.
- [19] LU Y, LIN J Q, LV J L, *et al.* All-fiber bidirectional mode-locked laser to generate cylindrical vector beam asynchronous noise-like pulses [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(19): 34012-34020.
- [20] TIAN Z B, PLANT D V. Picosecond flat-top pulse generation using dual-mode fiber Mach-Zehnder interferometers [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(23): 4542-4544.
- [21] OKAMOTO K. *Fundamentals of Optical Waveguides* [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [22] GUO Y, YAN F P, FENG T, *et al.* Stable multi-wavelength thulium-doped fiber laser with two cascaded single-mode-four-mode-single-mode fiber interferometers [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 1197-1204.
- [23] ZHANG K, WU P J, DONG J L, *et al.* Broadband mode-selective couplers based on tapered side-polished fibers [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(13): 19690-19702.
- [24] VELAZQUEZ-BENITEZ A M, ALVARADO J C, LOPEZ-GALMICHE G, *et al.* Six mode selective fiber optic spatial multiplexer [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(8): 1663-1666.



吕鑫(1999-),男,山西太原人,硕士研究生,2021年于延边大学获得学士学位,主要从事新型特种光纤及器件、光纤激光器方面的研究。
E-mail: 22125055@bjtu.edu.cn



任文华(1984-),男,河南新乡人,博士,副教授,2010年于北京交通大学获得博士学位,主要从事新型特种光纤及器件、光纤激光器、光纤通信等方面的研究。
E-mail: whren@bjtu.edu.cn