

基于模式选择耦合器的光纤模式可切换调 Q 激光器

程培康, 石帆, 王腾, 庞拂飞, 曾祥龙*

上海大学先进通信与数据科学研究院, 特种光纤与光接入网重点实验室,
特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444

摘要 基于腔内的模式选择耦合器(MSC),报道了一种输出模式可切换的调 Q 脉冲掺铒光纤激光器。通过布拉格光栅和 MSC 的共同作用,实现输出波长的选择和不同模式间的转换。由于 MSC 具有模式分离特性且激光腔具有双支路输出配置,通过调整腔内损耗可以实现对激光输出不同模式间的切换,成功地观察到了同时具有线偏振模式(LP₀₁模式和 LP₁₁模式)的双波长调 Q 脉冲输出,该模式可切换激光器可以应用在通信、粒子捕获等领域。

关键词 激光器; 调 Q 光纤激光器; 双波长; 可调横模; 少模布拉格光栅

中图分类号 TN248; TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1201001

Fiber Mode Switchable Q-Switched Laser Based on Mode Selective Coupler

Cheng peikang, Shi Fan, Wang Teng, Pang Fufei, Zeng Xianglong*

*Institute for Advanced Communication and Data Science, Key Lab of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network,
Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication,
Shanghai University, Shanghai 200444, China*

Abstract Based on the mode selective coupler (MSC) in a cavity, a Q-switched pulsed erbium-doped fiber laser with switchable output modes is reported in this work. Through the joint action of the Bragg grating and MSC, the output wavelength selection and the conversion between different modes are realized. Because the MSC has mode separation characteristics and the laser cavity has a dual-branch output configuration, the laser output can be switched between different modes by adjusting the cavity loss. The dual wavelength Q-switched pulse output with linear polarization modes (LP₀₁ mode and LP₁₁ mode) is successfully observed. The laser with switchable output modes can be used in communication, particle trapping, and other fields.

Key words lasers; Q-switched fiber laser; dual-wavelength; switchable transverse mode; few-mode fiber Bragg grating

OCIS codes 140.3540; 140.3510; 140.3500

1 引言

横向模式可调光纤激光器在光通信^[1-2]、超分辨率成像^[3-4]、材料加工^[5]、光学捕获^[6-7]等领域中具有广阔的应用前景,吸引了研究人员广泛的关注。一些模式转换器件,如光子晶体光栅^[8]、空间光调制器^[9-11]、光纤错位熔接结构^[12-13]、少模长周期光纤光栅(FM-LPG)^[14-15]和拉锥型模式转换耦合器(MSC)^[16-17],可用于生成特定的高阶模式。通过在

光纤激光器腔体中引入这些器件,就可以激发特定的光纤横向模态。全光纤模式转换器与大体积光纤组件和空间光器件相比,具有体积小、稳定性高和扩展性好的优点,使激光器实现了全光纤架构,且使其结构紧凑性和热稳定性都得到了提升。

为了在全光纤激光器中实现模式切换,除了需引入模式转换器外,还需要全光纤激光器具备模式选择机制,这对实现模式切换功能至关重要。少模光纤光栅(FM-FBG)被证明是一种有效的横向模式

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-07-19; 录用日期: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(91750108)、高等学校学科创新引智计划(111)资助(D20031)、上海高等学校特聘教授(东方学者)项目(16520720900)

* E-mail: zenglong@shu.edu.cn

选择器,且已经被广泛地用于横向模式选择^[18-20]。一方面,通过使用光纤错位熔接结构和 FM-FBG 的组合,可以使连续和脉冲光纤激光器实现输出可切换的横向模式^[21-23]。该方法利用光纤错位熔接激发出线偏振模式(LP₁₁ 模式),再通过 FM-FBG 来选择与激光波长有关的横向模式。然而,单模光纤(SMF)和少模光纤(FMF)之间的错位熔接会给激光结构带来额外的损耗和不稳定性,且需要额外的波长可调谐机制来调整激光发射波长和输出模式的关系。为此,迫切需要开发出一种简单的可实现激光模式切换的方法。

与激励高阶模态的横向错位方法相比,MSC 具有模式耦合效率高、插入损耗低和长期稳定性好等优点。目前已有多篇关于 MSC 型柱矢量光纤激光器的报道,且其性能得到了很好的验证^[24-29]。但是所报道的柱矢量光纤激光器存在一个共同的问题,即高阶模式在激光腔外产生。从某种程度上说,这种柱矢量激光器的模式转换方式属于外部模式转换。因此,在之前报道的基于 MSC 的激光器中,腔内只有单一的基模(LP₀₁)振荡^[30-31]。值得一提的是, MSC 具有固有的双分支结构,其中一个通道可以输出高纯度的高阶模式(即 LP₁₁、LP₀₂ 或 LP₂₁),另一个通道仍输出 LP₀₁ 模式。显然,不同的横向模态可以自发分离。通过控制这两个支路的传输损耗,可以灵活地生成基模或高阶模式。该技术可以应用于光纤激光器中,也可以实现激光模式的切换,这将促进高阶模式光纤激光器的进一步发展。

本文提出了一种基于腔内 MSC 的双光路光纤激光腔结构,它能够选择性地输出激光横模。MSC 在激光腔中充当模式转换器和波束分离器,在实现

模式转换的同时,也能将输入端的能量分解为两个独立的分支。将一个单模布拉格光栅(SMF-FBG)和一个 FM-FBG 分别拼接在激光器的两个分支的末端,用来选择激光的发射波长。同时将基于碳纳米管的饱和吸收体(CNT-SA)插入激光腔内,实现了自启动调 Q 脉冲输出。通过控制偏振控制器(PCs)改变激光腔内的偏振相关损耗,实现了脉冲单/双波长输出和 LP₀₁/LP₁₁ 模式的切换。

2 光纤激光器实验装置

模式可切换的调 Q 激光器结构图如图 1 所示。980 nm 激光二极管(LD)通过一个 980 nm 和 1550 nm 复用的波分复用器(WDM)与 5 m 长的掺铒光纤(EDF)相连。EDF(EDFC980-HP, Nufern)在 1530 nm 处的吸收为 6.0 dB/m,在 1550 nm 处的色散为 15.5 ps²/km。将一个由分光比为 8:2 的单模光纤耦合器构成的 Sagnac 环置于线性腔的一端作为光纤环形镜(FLM)。将一个 CNT-SA 通过跳线头和法兰连接在腔内,作为 Q 开关。这个装置在 1550 nm 处的插入损耗约为 2.5 dB。一个耦合比为 6:4 的 MSC(FMF 输出端功率占 60%)作为腔内的模式转换器和横向模式分离器。MSC 的输入端与 CNT-SA 连接,两个输出端将激光腔分为两个分支,与 FM-FBG 相连的是 FMF 输出端,与 SMF-FBG 相连的是 SMF 输出端。在两个输出端上各加上一个偏振控制器(PC1 和 PC2),用于调节腔内不同模式的偏振损耗。两个 FBGs 作为输出波长选择器,与 CCD 相机相连以监控腔内的振荡模式。环形镜的输出端与示波器(DSO)和光谱仪(OA)相连,用于监控激光器的输出信号。

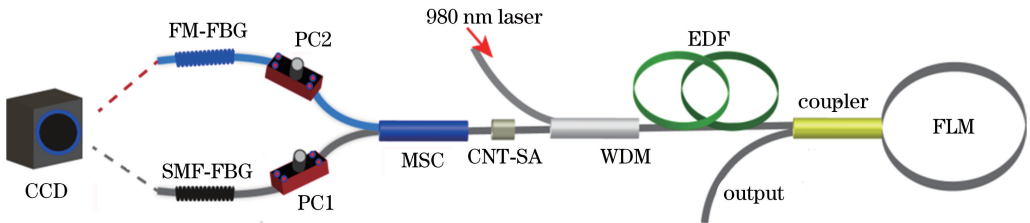


图 1 模式可切换调 Q 掺铒激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of Q-switched erbium-doped fiber laser with switchable mode

3 模式选择器件特性表征

在激光器中,实现输出脉冲的波长和模式可切换主要依靠的是 FM-FBG。FM-FBG 是通过紫外准分子激光相位掩模法在两模光纤(TM)上进行刻写而得到的。图 2(a)为测量 FM-FBG 反射特性

的实验装置。这里采用高纯度的 LP₁₁ 模式源作为测量装置的光源,LP₁₁ 模式源是通过 MSC 将宽带光源(BBS)的 LP₀₁ 模式进行转换得到的。虚线框表示的是 MSC 的结构图,它由熔融的 SMF 和 FMF 组成。融合过程中,两根光纤的直径和相应的传输常数发生变化。当这两个光纤相位完全匹配(两根

光纤的传输常数相等),功率在耦合区域发生周期性的交换,然后 SMF 中的 LP_{01} 模式被耦合至 FMF 中的 LP_{11} 模式。SMF 和 FMF 输出端口的功率比在熔融拉锥过程中可以被实时监测。详细的制作过程可以在之前的工作^[21]中找到。选用的 MSC 在 LP_{11} 模式下的功率耦合比为 3:5。耦合比定义为 FMF 输出端的高阶模态功率与总输入功率的比值。通过模式剥离法^[19]计算出该 MSC 的 FMF 输出端的 LP_{11} 模式的纯度为 96%。为保证 LP_{11} 模式能在光纤纤芯中顺利传输,将 FMF 输出端与定制的少模光纤环形器相连。 LP_{11} 模式光束从环形器的 1

端口输入,通过 2 端口传输到 FM-FBG 中,只有满足相位匹配条件的光束被 FM-FBG 反射,从而再次传输至环形器的 2 端口,并经环形器的 3 端口输出。利用与 3 端口相连的 OSA,可以得到 FM-FBG 的反射峰。

FM-FBG 的透射谱如图 2(b)所示,可以看到,透射谱内有三个反射峰。最右边的反射峰位于 1536.56 nm 处,表示 LP_{01} 模式与 LP_{01} 模式的耦合。中间的反射峰表示 LP_{01} 模式和 LP_{11} 模式之间的交叉耦合。最左边的反射峰位于 1532.15 nm 处,表示 LP_{11} 模式与 LP_{11} 模式的耦合。

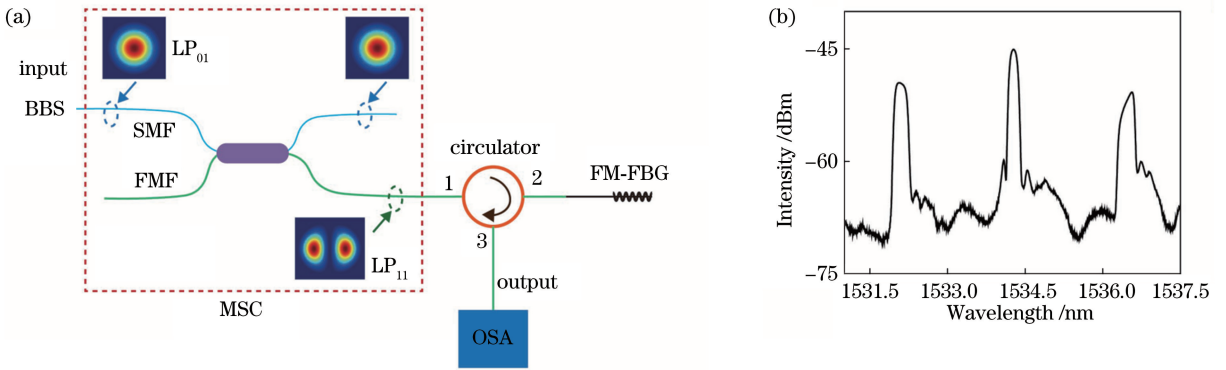


图 2 FM-FBG 反射峰测量。(a) FM-FBG 反射峰测量装置图,虚线框中的是 MSC 结构图;
(b)输入高纯度 LP_{11} 模式的宽带光时测得的反射谱

Fig. 2 Measurement of reflection peak of FM-FBG. (a) Setup used to test reflection peaks of FM-FBG. Dashed box indicates diagram of MSC; (b) measured reflection spectrum of incident broadband light with highly purified LP_{11} mode

4 实验结果和分析

在 CNT-SA 的作用下,当抽运功率达到 30 mW 时,可以在单波长 1530.5 nm、单波长 1532.15 nm 和双波长处很容易地实现自启动调 Q 脉冲输出。对于单模振荡,激光器的输出波长取决于 SMF-FBG 的反射波长。装置中所使用的 SMF-FBG 的中心波长为 1530.5 nm,对应的 3 dB 带宽为 0.2 nm。为了使激光输出波长为 1530.5 nm,需要通过调节 PC2 使腔内的 LP_{11} 模式产生偏振相关损耗。当 LP_{11} 模式的损耗足够大时,由 MSC 产生的 LP_{01} 模式传输到 SMF-FBG 端口,同时在 FMF 端的 LP_{11} 模式耗尽。因此,激光以 LP_{01} 模式振荡工作在 1530.5 nm 波长。脉冲串在不同的抽运功率(P_{in})下的输出显示在图 3(a)中,可以看到随着抽运功率的增加,对应的脉冲重复频率(F_{rep})增大。

图 3(b)显示了抽运功率为 60 mW 时 1530.5 nm 波长处的调 Q 脉冲输出,此时对应的脉宽为 2.9 ms。当抽运功率为 90 mW 时,输出端口

的输出功率达到 1.6 mW,如图 3(c)所示,图中插图 为从 SMF-FBG 输出端口观测到的 LP_{01} 模式光斑图。激光器输出脉宽和重复频率与抽运功率之间的关系如图 3(d)所示。当抽运功率从 30 mW 增加至 90 mW 时,脉宽从 3.9 ms 减小到 2.4 ms,而重复频率从 23.8 kHz 增大至 52.1 kHz。

通过调节 PC1 使单模光纤受到挤压并发生弯曲时,MSC 与 SMF-FBG 之间会产生较大的损耗,此时 LP_{01} 模式的传输光不能在腔内振荡并形成激光,而 LP_{11} 模式的传输光可以继续传输至 FM-FBG。之后,满足相位匹配条件的 LP_{11} 模式将被 FM-FBG 反射,经过 MSC 时能够可逆地转换回 LP_{01} 模态,然后返回到单模光纤并继续在腔内传输。也就是说, LP_{11} 模式可以完全耦合回 SMF,从而在环形镜和 FM-FBG 之间形成谐振回路。最后,激光会在腔内的 MSC 和 FM-FBG 之间以 LP_{11} 模式运行,而在 MSC 和环形镜之间则以 LP_{01} 模式振荡。此时输出波长与 FM-FBG 最左峰值波长 (1532.15 nm)相匹配。

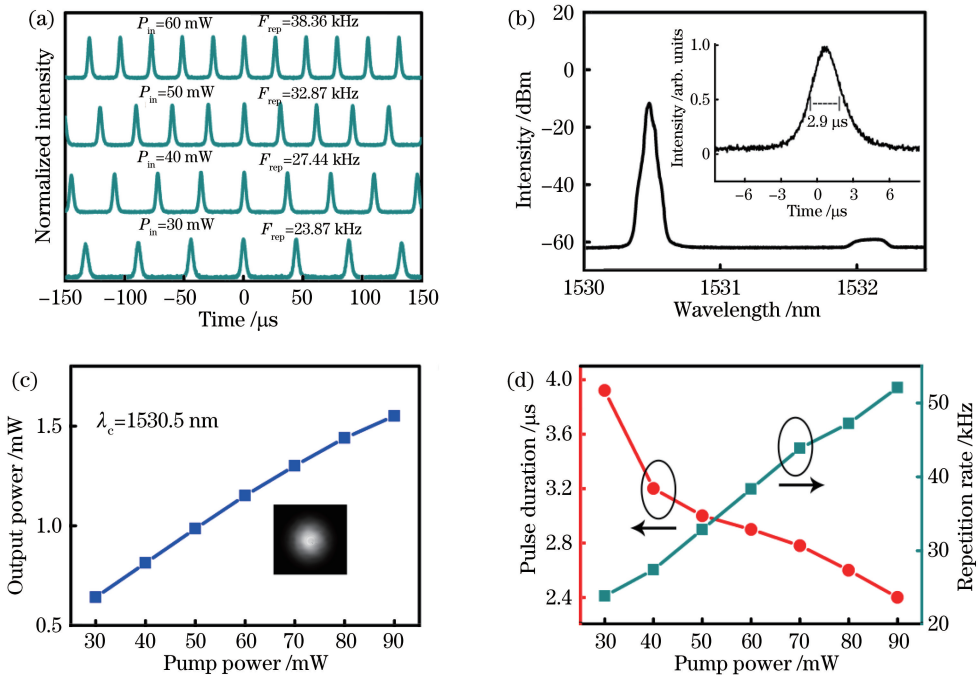


图 3 1530.5 nm 处的激光输出。(a)不同抽运功率下的调 Q 脉冲序列;(b)抽运功率为 60 mW 时的输出光谱和脉宽;(c)输出功率和抽运功率的关系,插图为 SMF-FMF 端输出的模斑图;(d)重复频率和脉宽与抽运功率的关系

Fig. 3 Laser outputs at 1530.5 nm. (a) Q-switched pulse trains under different pump powers; (b) output spectrum and pulse duration under pump power of 60 mW; (c) output power as a function of pump power. Inset is laser mode monitored from SMF-FBG port; (d) repetition rate and pulse duration as functions of pump power

如图 4(a)所示,重复频率随着抽运功率的不同而逐渐变化,这与在 1530.5 nm 波长处的激光调 Q 自启动情况相似。输出光谱如图 4(b)所示,在抽运功率为 60 mW 时,测得脉冲输出中心波长在 1532.15 nm 处,而脉宽为 3 ms。此外,输出功率与抽运功率的关系如图 4(c)所示。当抽运功率从 30 mW 增加到 90 mW,重复频率和脉宽随抽运功率的变化如图 4(d)所示。可以看出,当抽运功率从 30 mW 增加到 90 mW 时,脉宽越来越短,从 4.2 ms 减小到 2.5 ms,而脉冲重复频率逐渐增加,从 22.6 kHz 增加到 42.5 kHz。由于 MSC 的分光比不同,不同输出波长对应的激光腔内损耗不同,所以同一抽运功率下两个波长下的脉冲重复频率有一些差别。从 FM-FBG 输出端观测的模斑图如图 4(e)所示,呈现出环形强度分布。为了分析一阶模式光束的偏振态,在 CCD 相机前方放置了一个起偏器。当转动起偏器时,每个模斑图案的方向与偏振器的旋转传输轴方向一致,这表明输出光束呈径向偏振。

当旋转腔内的两个 PC 使引入的损耗较小时,

激光器可以实现双波长(即 1530.5 nm 和 1532.15 nm)输出,此时可以同步得到 LP₀₁ 模式和 LP₁₁ 模式的输出,如图 5(a)所示。激光器内部的工作状态可以定义为:在环形镜和 SMF-FBG 之间,LP₀₁ 模式在振荡;在 MSC 和 FM-FBG 之间,LP₁₁ 模式在振荡。此时,脉冲的重复频率和脉宽与抽运功率的关系体现在图 5(b)中,它们之间的关系大致和单波长输出时一致,即当抽运功率增大时,激光器的重复频率相应地增大,而脉宽相应地变小。图 5(c)为不同抽运功率下的调 Q 脉冲序列。

5 结 论

通过实验对模式可切换的被动调 Q 光纤激光器的性能进行了验证。激光器腔内的 MSC 起模式转换和模式分离的作用,SMF-FBG 和 FM-FBG 分别起波长选择和模式选择的作用。激光腔内可以形成单模振荡和少模振荡,输出激光的模式选择得以实现。这种激光器结构可用于其他光纤增益光谱区,具有广阔的应用场景。

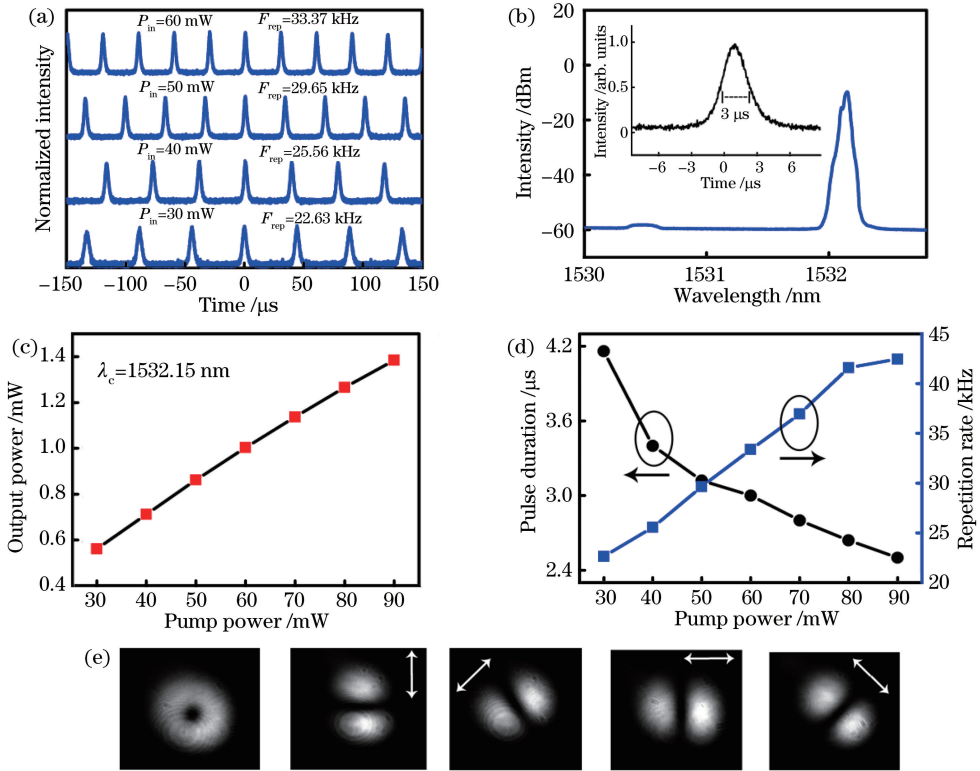


图 4 1532.15 nm 处的激光输出。(a)不同抽运功率下的调 Q 脉冲序列;(b)抽运功率为 60 mW 时的调 Q 脉冲输出光谱和脉宽;(c)输出功率和抽运功率的关系;(d)重复频率和脉宽与抽运功率的关系;(e)径向偏振光束经过起偏器后的环形强度分布及相应的偏振状态

Fig. 4 Laser outputs at 1532.15 nm. (a) Q-switched pulse trains under different pump powers; (b) Q-switched pulse output spectrum at 60 mW pump power and pulse duration; (c) output power versus pump power; (d) repetition rate and pulse duration as functions of pump power; (e) donut-shaped intensity distributions of radially polarized beam after passing through polarizer and corresponding polarization states

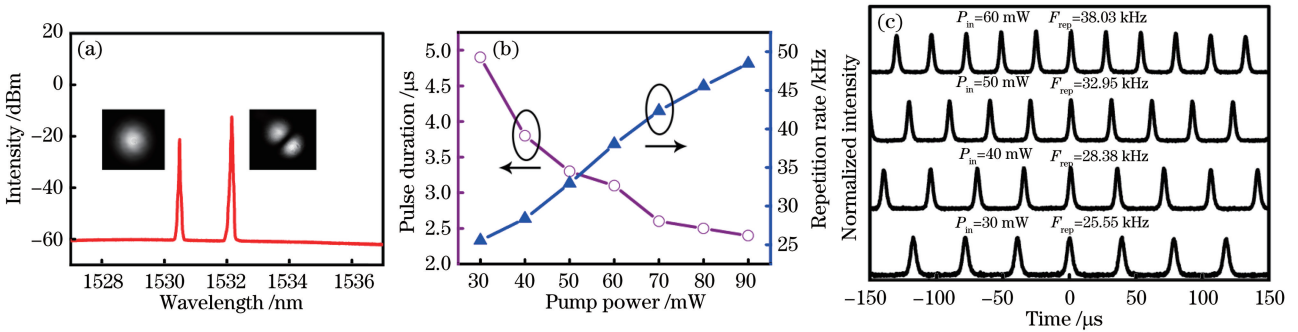


图 5 1530.5 nm 处和 1532.15 nm 处的激光双波长输出。(a)双波长调 Q 输出以及 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式;(b)重复频率和脉宽与抽运功率的关系;(c)不同抽运功率下的调 Q 脉冲序列

Fig. 5 Laser dual-wavelength outputs at 1530.5 nm and 1532.15 nm. (a) Dual-wavelength Q-switched output and LP₀₁ and LP₁₁ modes; (b) repetition rate and pulse duration as functions of pump power; (c) Q-switched pulse trains under different pump powers

参 考 文 献

[1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.

[2] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 66-106.

[3] Chen J, Zhan Q W. Tailoring laser focal fields with

- vectorial optical fields[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126002.
- 陈建, 詹其文. 矢量光场与激光焦场定制[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126002.
- [4] Yang Y Q, Wu S B, Zhang Y, et al. Application progress and prospect of fiber laser in metal additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500012.
- 杨永强, 吴世彪, 张越, 等. 光纤激光器在金属增材制造中的应用进展及展望[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500012.
- [5] Novotny L, Beversluis M R, Youngworth K S, et al. Longitudinal field modes probed by single molecules [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(23): 5251-5254.
- [6] Zhang Y Q, Shen J F, Min C J, et al. Nonlinearity-induced multiplexed optical trapping and manipulation with femtosecond vector beams [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(9): 5538-5543.
- [7] Gahagan K T, Swartzlander G A. Simultaneous trapping of low-index and high-index microparticles observed with an optical-vortex trap [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(4): 533-537.
- [8] Lin D, Xia K G, Li R X, et al. Radially polarized and passively Q-switched fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3574-3576.
- [9] Ngcobo S, Litvin I, Burger L, et al. A digital laser for on-demand laser modes [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2289.
- [10] Boruah B R. Dynamic manipulation of a laser beam using a liquid crystal spatial light modulator [J]. *American Journal of Physics*, 2009, 77(4): 331-336.
- [11] Fu S Y, Gao C Q. Selective generation of arbitrary vectorial vortex beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126014.
- 付时尧, 高春清. 矢量涡旋光束的模式连续可调生成技术[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126014.
- [12] Jin X Q, Pang F F, Zhang Y, et al. Generation of the first-order OAM modes in single-ring fibers by offset splicing technology[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1581-1584.
- [13] Xia F, Zhao Y, Hu H F, et al. Broadband generation of the first-order OAM modes in two-mode fiber by offset splicing and fiber rotating technology [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 436-441.
- [14] Zhao Y H, Liu Y Q, Zhang C Y, et al. All-fiber mode converter based on long-period fiber gratings written in few-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4708-4711.
- [15] Tao H, Mi Y A, Ren W H, et al. Vector mode conversion based on tilted long-period fiber grating written in ring fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0606002.
- 陶洪, 卮月安, 任文华, 等. 基于环形光纤的倾斜长周期光纤光栅的矢量模式转换[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0606002.
- [16] Ismaeel R, Lee T, Oduro B, et al. All-fiber fused directional coupler for highly efficient spatial mode conversion [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11610-11619.
- [17] Pelegrina-Bonilla G, Hausmann K, Sayinc H, et al. Analysis of the modal evolution in fused-type mode-selective fiber couplers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 22977-22990.
- [18] Zhou Y, Wang A T, Gu C, et al. Actively mode-locked all fiber laser with cylindrical vector beam output[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 548-550.
- [19] Xu C L, Yan K, Gu C, et al. All-fiber laser with flattop beam output using a few-mode fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1247-1250.
- [20] Yan K, Lin J, Zhou Y, et al. Bi₂Te₃ based passively Q-switched fiber laser with cylindrical vector beam emission[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(11): 3026-3029.
- [21] Dong J L, Chiang K S. Mode-locked fiber laser with transverse-mode selection based on a two-mode FBG [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(17): 1766-1769.
- [22] Sun B, Wang A T, Xu L X, et al. Low-threshold single-wavelength all-fiber laser generating cylindrical vector beams using a few-mode fiber Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 464-466.
- [23] Yao S Z, Ren G B, Yang Y G, et al. Few-mode fiber Bragg grating-based multi-wavelength fiber laser with tunable orbital angular momentum beam output[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(9): 095001.
- [24] Wang T, Wang F, Shi F, et al. Generation of femtosecond optical vortex beams in all-fiber mode-locked fiber laser using mode selective coupler [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(11): 2161-2166.
- [25] Zhang Z X, Cai Y, Wang J, et al. Switchable dual-wavelength cylindrical vector beam generation from a passively mode-locked fiber laser based on carbon nanotubes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-6.
- [26] Huang Y P, Shi F, Wang T, et al. High-order mode Yb-doped fiber lasers based on mode-selective couplers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19171-19181.

- [27] Wang T, Lu J F, Huang Y P, et al. Generation and research progress of all-fiber ultrafast vector optical fields[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508010.
王腾, 陆佳峰, 黄译平, 等. 全光纤超快矢量光场的产生与研究进展 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508010.
- [28] Shen Y, Ren G B, Yang Y G, et al. Switchable narrow linewidth fiber laser with LP11 transverse mode output[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 1-6.
- [29] Song H Q, Zhao Z X, Xian L L, et al. A wavelength-tunable narrow-linewidth all-fiber laser with cylindrical vector beam outputs [J]. Optics Communications, 2018, 428: 245-250.
- [30] Naidoo D, Roux F S, Dudley A, et al. Controlled generation of higher-order Poincaré sphere beams from a laser [J]. Nature Photonics, 2016, 10(5): 327-332.
- [31] Huang B, Yang L, Du L, et al. Highly efficient vectorial fiber laser with switchable output [J]. Optics Letters, 2017, 29(21): 1852-1855.