

波长可调谐的锁模柱矢量光纤激光器

吕家亮, 姚培军, 许立新

Wavelength-tunable mode-locked cylindrical vector beam fiber laser

引用本文:

吕家亮, 姚培军, 许立新. 波长可调谐的锁模柱矢量光纤激光器[J]. *激光技术*, 2023, 47(4): 454–458.

L Jialiang, YAO Peijun, XU Lixin. Wavelength-tunable mode-locked cylindrical vector beam fiber laser[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(4): 454–458.

您可能感兴趣的其他文章

1. 单波长和双波长可调谐的掺镱锁模光纤激光器

引用本文: 林加强, 戴川生, 姚培军, 等. 单波长和双波长可调谐的掺镱锁模光纤激光器[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 301–304.

2. 室温下的主动锁模Ho:YAG激光器

引用本文: 王吉, 王涛. 室温下的主动锁模Ho:YAG激光器[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 840–842.

3. 可调谐单纵模多波长光纤激光器的研究

引用本文: 陈龙辉, 谢芳, 郭晓蕾, 等. 可调谐单纵模多波长光纤激光器的研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 681–685.

4. 高重频风冷声光调Q光纤激光器实验研究

引用本文: 陈鹏飞, 伍波, 沈琪皓, 等. 高重频风冷声光调Q光纤激光器实验研究[J]. *激光技术*, 2015, 39(6): 780–784.

5. 单脉冲锁模光纤激光器输出特性的数值研究

引用本文: 王健, 唐信, 林静, 等. 单脉冲锁模光纤激光器输出特性的数值研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 784–787.

文章编号: 1001-3806(2023)04-0454-05

波长可调谐的锁模柱矢量光纤激光器

吕家亮^{1,2,3}, 姚培军^{1,2,3}, 许立新^{1,2,3*}

(1. 中国科学技术大学 核探测与核电子学国家重点实验室, 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学 物理学院 光学与光学工程系, 合肥 230026; 3. 先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230026)

摘要: 为了在光纤激光器中获得具有中心波长可调谐的锁模脉冲柱矢量, 采用半导体可饱和吸收镜和高反的啁啾光纤光栅作为腔镜, 搭建了直腔掺镱脉冲光纤激光器, 腔内插入长周期光纤光栅作为模式转化器件, 进行了实验验证, 取得了波长可调谐的柱矢量脉冲数据。结果表明, 激光器工作在 1060.72 nm 时, 光谱带宽 0.22 nm, 输出斜率效率为 8.6%, 锁模脉冲宽度为 10.9 ps, 重频 18.66 MHz, 锁模脉冲信噪比高达 65 dB, 同时获得了模式纯度超过 97% 的柱矢量光束; 调节腔内的偏振控制器来改变腔内波长的损耗, 可以实现锁模柱矢量脉冲的谐振波长在 1060.72 nm~1066.04 nm 连续可调。该研究为可调谐脉冲柱矢量光纤激光器研制提供了重要的参考价值。

关键词: 激光器; 波长可调谐; 锁模; 柱矢量光束; 掺镱光纤激光器

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.04.002

Wavelength-tunable mode-locked cylindrical vector beam fiber laser

LÜ Jialiang^{1,2,3}, YAO Peijun^{1,2,3}, XU Lixin^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Department of Optics and Optical Engineering, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230026, China)

Abstract: To obtain wavelength-tunable pulse cylindrical vector beam, a linear cavity mode-locked doped-Yb fiber laser was experimentally constructed by using a chirped fiber grating and a semiconductor saturable absorption mirror. A long-period fiber grating was inserted into the cavity to serve as mode conversion device. The results show that when the mode-locked fiber laser operates at 1060.72 nm, the spectral width, slope efficiency, pulse width, fundamental repetition frequency, signal-to-noise ratio, and the cylindrical vector beam mode purity is 0.22 nm, 8.6%, of 10.9 ps, 18.66 MHz, 65 dB, >97%, respectively. Besides, the operating wavelength of the mode-locked fiber laser can be continuously tuned from 1060.72 nm to 1066.04 nm due to the changing of the cavity loss by adjusting the polarization controller. This study may provide an important reference for the development of wavelength-tunable pulsed cylindrical vector beam fiber laser.

Key words: lasers; wavelength tuning; mode-locked; cylindrical vector beam; ytterbium doped fiber laser

引 言

柱矢量光束(cylindrical vector beams, CVB)因其独特的环形强度空间分布及其对称的偏振分布^[1], 已经在激光材料加工、表面喇曼光谱增强及受激发射损耗荧光显微、光纤通信、粒子操控等领域呈现了巨大的实际应用价值^[2-7]。为了在光纤激光器中获得这种柱

矢量光, 研究人员陆续提出了多种产生方法。早期通过错位拼接技术激发 LP₁₁ 模式并利用少模光纤光栅选择横模^[8], 但该方法拼接损耗大、耦合效率较低; 随后研究人员利用少模光纤光栅对^[9-10]、模式选择耦合器^[11]、长周期光纤光栅^[12]、金属横模过滤器^[13]等模式选择器或模式转化器件获得了柱矢量光输出。相比较连续工作的柱矢量光, 脉冲 CVB 具有高能量、高峰值功率, 在金属材料精细加工^[14]、电子加速^[15-16]等领域有着潜在的应用价值。将柱矢量产生方法与锁模技术相结合是一种有效的实现方案。2016 年, ZHOU 等人基于碳纳米管获得自启动锁模脉冲工作, 结合错位拼接技术和具有模式选择功能的少模布喇格光纤光栅, 实现了 1547.5 nm 脉冲柱矢量光输出^[17]。2017 年,

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFF0307804); 安徽省先进激光技术实验室开放项目(AHL2021ZR02)

作者简介: 吕家亮(1995-), 男, 博士研究生, 现主要从事矢量光调控及超快光纤激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xulixin@ustc.edu.cn

收稿日期: 2022-06-16; 收到修改稿日期: 2022-07-14

WAN 等人结合非线性放大环形镜和模式选择耦合器实现了 1556.3 nm 柱矢量锁模^[18]。2020 年,TAO 等人利用长周期光纤光栅和非线性偏振旋转技术实现了中心波长 1030 nm 的高纯度柱矢量锁模脉冲输出^[19]。这些柱矢量锁模光纤激光器工作在固定的波长,缺少波长调谐的灵活性,限制了脉冲柱矢量在传感、激光微加工、波分复用等领域的应用^[20-23],然而,具有波长灵活可调谐的锁模柱矢量光纤激光器却很少报道。

本文中搭建了波长可调谐脉冲柱矢量直腔光纤激光器,采用啁啾光纤光栅及半导体可饱和吸收镜充当反射镜和锁模元件,腔内插入的长周期光纤光栅实现基模到高阶模的转化,激光器的锁模阈值为 53.5 mW,输出斜率效率为 8.6%。通过调节腔内的偏振控制器来改变腔内波长的损耗,柱矢量脉冲激光器的谐振波长能灵活地调谐在 1060.72 nm~1066.04 nm 范围内。通过消除 LP₁₁ 模式的简并,获得了模式纯度为 97.4% 的 TM₀₁ 模式和 97.6% 的 TE₀₁ 模式。

1 实验结构和原理

波长可调谐的柱矢量锁模光纤激光器的结构如图 1 所示。激光腔是由两种光纤部分组成的混合腔,左边黄褐色线条为普通单模光纤(HI1060),右边青蓝色线条代表少模光纤(single mode fiber, SMF)(SMF-28E,在 1064 nm 波长处仅支持 LP₀₁ 模式和 LP₁₁ 模式传输)。抽运源是一个中心波长为 976 nm 激光二极管(laser diode, LD),抽运光经过波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)耦合进长度为 45 cm 的掺镱光纤(Liekki Yb1200,纤芯在 976 nm 处的吸收系数 1200 dB/m)中。该激光器采用直腔结构,一个商用的半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)(BATOP, SAM-1064-28-15ps-1.3b-0)作为一个反射镜并起到可饱和吸收体的功能,具有 18% 的调制深度、30 μJ/cm² 的饱和通量、10% 的非饱和损耗以及 1.5 mJ/cm² 的损伤阈值,能够实现稳定的锁模脉冲工作。啁啾光纤布喇格光栅(chirp fiber Bragg grating, CFBG)作为激光器的另一个腔镜,其反射光谱如图 2 所示,它由啁啾相位掩模版刻写,啁啾率为 2 nm/cm,具有分布式反射的特性。其中心波长为 1064 nm,3 dB 带宽为 7.4 nm,反射率高于 99%,色散为 33 ps/nm,使激光器工作在反常色散区域。为了获得高阶模输出,腔内引入了长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPFG)作为模式转化器件,它是由 CO₂ 激光器在 SMF-28E 光纤上刻写的,在 940 nm~

1065 nm 波长范围内模式转化效率超过了 93.7%^[19]。引入的长周期光纤光栅可以将左侧单模光纤入射的基模高效率地转化为 LP₁₁ 模式,并通过一个 70:30 的少模光纤耦合器(optical coupler, OC)提取腔内 30% 的能量作为激光器的输出,剩余的 70% 的高阶模能量到达 SESAM,其 LP₁₁ 模式经 SESAM 反射回腔内,通过长周期光纤光栅转为 LP₀₁ 模式,经左侧单模增益光纤放大后,被啁啾光纤光栅再次反射回腔内,如此循环,LP₀₁ 模式谐振在左侧单模光纤,LP₁₁ 模式谐振在右侧两模光纤。SESAM 和输出耦合器之间放置一偏振控制器(polarization controller, PC)来协助锁模以及调节腔内各模式的损耗。通过调节 PC,使得各个波长的腔损不同以实现波长调谐的功能。整个激光器采用全光纤结构,总腔长为 5.5 m。在实验中,使用光谱仪(Yokogawa AQ6373B)、配有带宽 4 GHz 的光电探测器的示波器(LeCroy Wave Runner 640Zi, 4 GHz)、射频谱分析仪(AV4021)、自相关仪(APE PulseCheck)、功率计(Thorlabs PM100D)以及近红外 CCD 相机测量激光器输出特性。

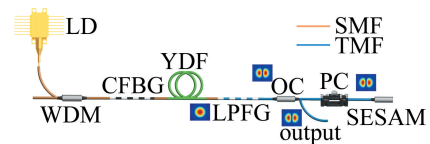


图 1 激光器实验装置图

Fig. 1 The experimental setup of laser

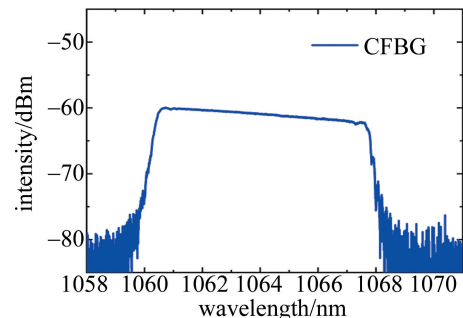


图 2 测量的啁啾光纤光栅的反射光谱

Fig. 2 The measured reflection spectrum of CFBG

2 实验结果和分析

当抽运功率设定在 0 mW~53 mW 范围时,激光器在窄线宽连续光下运转;将抽运功率调至 78 mW(激光锁模阈值为 53.5 mW),同时旋转或挤压腔内的 PC,可以获得稳定的锁模脉冲运作,测得输出功率为 4.1 mW。图 3 是该抽运条件下脉冲激光器的输出特征。激光器谐振在 1060.72 nm,光谱带宽为 0.22 nm,如图 3a 中蓝色实线所示。输出光谱右侧具有明显的

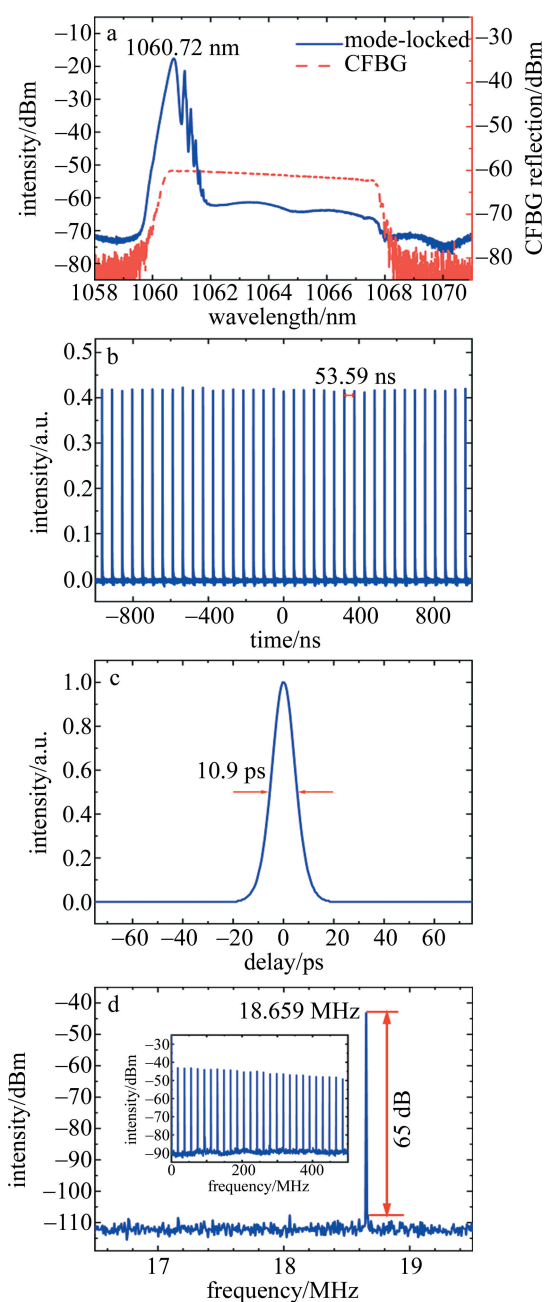


图3 a—光谱图 b—示波器轨迹图 c—自相关轨迹图 d—射频频谱图
Fig. 3 a—optical spectrum b—pulse trace c—autocorrelation trace
d—radio frequency spectrum

凯利边带,证明激光器工作在反常色散区内的典型传统孤子。这种不对称的凯利边带主要归因于啁啾光纤光栅左侧强的滤波效应^[24-25]。图3b是示波器轨迹图,相邻脉冲序列间隔为53.59 ns,对应的重频为18.66 MHz。实验中激光器谐振腔分为两部分,腔长为5.5 m,左侧单模光纤约1.5 m为LP₀₁模式谐振,右侧约4 m长的两模光纤为LP₁₁模式谐振。故锁模激光器的基重频 f 与腔长的关系可以表达为:

$$f = \frac{c}{2(n_{LP_{01}}L_{LP_{01}} + n_{LP_{11}}L_{LP_{11}})} \quad (1)$$

式中, c 为光速, $n_{LP_{01}}$ 为单模光纤LP₀₁模式的有效折射率; $n_{LP_{11}}$ 为两模光纤中LP₁₁模式的有效折射率; $L_{LP_{01}}$ 为LP₀₁模式在腔内传输的长度,约为1.5 m; $L_{LP_{11}}$ 为LP₁₁模式在腔内传输的长度,约为4 m;通过计算得到基重频 $f \approx 18.66$ MHz,这与5.5 m腔长相匹配。输出脉冲的强度自相关轨迹如图3c所示,自相关仪的扫描范围设定为150 ps,测得其半峰全宽为10.9 ps。采用射频频谱分析仪在4 MHz范围内进行扫描,得到的射频图如图3d所示,射频光谱位于18.66 MHz,说明激光器此时工作在基频锁模,其信噪比高达65 dB。此外,频谱仪扫描范围设定为500 MHz时,也没有观察到明显的强度调制。以上实验结果表明,该锁模激光器具有很好的工作稳定性。

图4为锁模脉冲激光器输出功率与抽运功率的对应关系。基于线性拟合计算出激光器的效率为8.6%。当抽运功率调至140 mW时,9.5 mW的输出功率被获得。值得一提的是,保持腔内偏振控制器状态不变,设定抽运功率高于53.5 mW时,激光器能实现稳定的自启动。

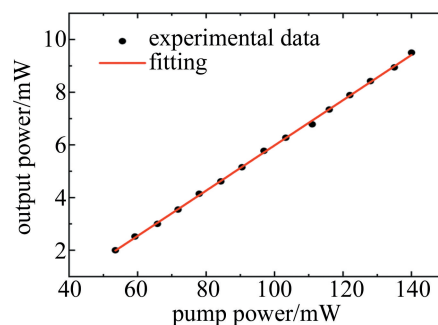


图4 输出功率随抽运功率变化图

Fig. 4 Output power at different pump powers

为了观察激光器输出的光场特性,本文作者利用一个近红外 CCD 相机监测锁模激光器输出端光斑的强度分布。在输出端加一个偏振控制器去消除LP₁₁模式的简并度,通过仔细地调节输出端的偏振控制器,径向偏振光束(TM₀₁)和角向偏振光束(TE₀₁)输出能被实现。环形中空状的强度分布被清楚地观察到,如图5a和图5f所示。本文作者在输出端与CCD之间放置一个起偏器作为检偏器,通过旋转起偏器的方向,输出模式的偏振特性被表征,环形强度分布的输出光斑通过检偏器后变为两瓣分布,两瓣的旋转方向和起偏器的旋转方向一致,若两瓣分布方向与检偏器轴的方向

向平行,则为径向偏振光,如图 5b~图 5e 所示;若两瓣分布方向与检偏器轴的方向垂直,则为角向偏振光,如图 5g~图 5j 所示。为了获得这两个输出模式的纯度,基于光纤弯曲法^[26]进行纯度测量,经计算,径向偏振光的模式纯度为 97.4%,角向偏振光的纯度为 97.6%。

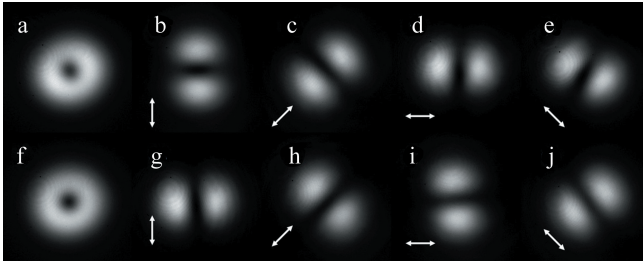


图 5 a~e—径向偏振光及其通过起偏器后的图案 f~j—角向偏振光及其通过起偏器后的图案

Fig. 5 a~e—the pattern of radially polarized beam and its pattern after passing through a linear polarizer f~j—the pattern of azimuthally polarized beam and its pattern after passing through a linear polarizer

当保持 78 mW 的抽运功率不变,仅仅通过调节腔内的偏振控制器,腔内各个模式的损耗发生改变,在啾啾光纤光栅的共同作用下,可使得脉冲柱矢量激光器谐振在其它波长。如图 6a 所示,激光器的谐振波长能够从原先的 1060.72 nm 灵活地调谐到 1061.17 nm、1061.96 nm、1062.80 nm、1064.13 nm、1065.30 nm、1066.04 nm,其波长调谐范围为 5.32 nm,它被 CFBG

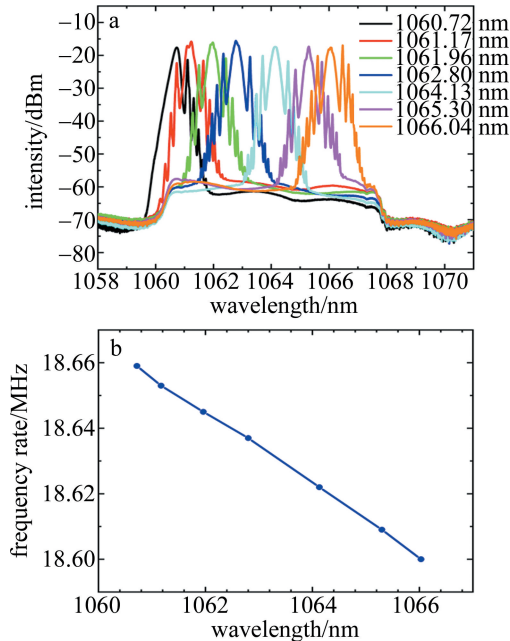


图 6 a—波长可调谐的锁模光谱图 b—重复频率和锁模中心波长的关系

Fig. 6 a—the spectrum of wavelength-tunable mode-locked laser b—relationship between frequency rate and center wavelength of mode-locked laser

的反射带宽限制,可以使用更大带宽的 CFBG 提高波长调谐的范围。图 6b 所示是锁模脉冲的重复频率与中心波长的关系。随着中心波长向长波方向移动,激光脉冲的重复频率从 18.66 MHz 减小到 18.60 MHz,这种现象是由色散引起的,不同波长在腔内的群速度是不同的,在这个反常色散腔内,长波在腔内往返一次时间更长,即长波对应的重复频率更小。

3 结论

基于 SESAM 和啾啾光纤光栅搭建了波长可调谐锁模柱矢量光纤激光器,获得了稳定的柱矢量锁模皮秒量级脉冲,其输出模式纯度高达 97%。通过调节腔内的偏振控制器,获得了输出中心波长连续可调谐,锁模柱矢量脉冲信噪比高达 65 dB。这种锁模光纤激光器结构简单、波长灵活可调、可输出环形强度分布的柱矢量光,在激光加工、粒子操控及光纤通信等领域有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] ZHAN Q. Cylindrical vector beams: From mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [2] NIZIEV V G, NESTEROV A V. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. *Journal of Physics*, 1999, D32(13): 1455-1461.
- [3] 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.
- [4] HUANG L, GUO H, LI J, *et al.* Optical trapping of gold nanoparticles by cylindrical vector beam[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1694-1696.
- [5] YAO H, SHI F, WU Z Y, *et al.* A mode generator and multiplexer at visible wavelength based on all-fiber mode selective coupler[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(4): 973-981.
- [6] ZHANG L, ZHANG W D, LU F F, *et al.* Azimuthal vector beam exciting silver triangular nanoprisms for increasing the performance of surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(12): 1447-1453.
- [7] KUGA T, TORII Y, SHIOKAWA N, *et al.* Novel optical trap of atoms with a doughnut beam[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(25): 4713-4716.
- [8] GROSJEAN T, COURJON D, and SPAJER M. An all-fiber device for generating radially and other polarized light beams[J]. *Optics Communications*, 2002, 203(1/2): 1-5.
- [9] 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]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5692-5695.
- [10] LI H X, YAN K, ZHANG Y M, *et al.* Low-threshold high-efficiency all-fiber laser generating cylindrical vector beams operated in LP₁₁ mode throughout the entire cavity[J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(12): 122502.1-122502.3

- [11] 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.
- [12] ZHAO Y, LIU Y, ZHANG L, *et al.* Mode converter based on the long-period fiber gratings written in the two-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6186-6195.
- [13] ZHANG Y, LI H, DAI C, *et al.* All-fiber high-order mode laser using a metal-clad transverse mode filter[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 29679-29686.
- [14] MEIER M, ROMANO V, FEURER T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation[J]. *Applied Physics*, 2006, A86(3): 329-334.
- [15] MALKA V, FRITZLER S, LEFEBVRE E, *et al.* Electron acceleration by a wake field forced by an intense ultrashort laser pulse[J]. *Science*, 2002, 298(5598): 1596-1600.
- [16] MARCEAU V, APRIL A, PICHE M. Electron acceleration driven by ultrashort and nonparaxial radially polarized laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2442-2444.
- [17] ZHOU Y, LIN J, ZHANG X, *et al.* Self-starting passively mode-locked all fiber laser based on carbon nanotubes with radially polarized emission[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 327-330.
- [18] WAN H, WANG J, ZHANG Z, *et al.* High efficiency mode-locked, cylindrical vector beam fiber laser based on a mode selective coupler [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11444-11451.
- [19] TAO R X, LI H X, ZHANG Y M, *et al.* All-fiber mode-locked laser emitting broadband-spectrum cylindrical vector mode[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 123: 105945.
- [20] TALAVERANO L, ABAD S, JARABO S, *et al.* Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(4): 553-558.
- [21] ZHU J, YANG Y, ZHANG Z, *et al.* Weakly-coupled MDM-WDM amplification and transmission based on compact FM-EDFA [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 5163-5169.
- [22] YE M, YU Y, ZOU J, *et al.* On-chip multiplexing conversion between wavelength division multiplexing-polarization division multiplexing and wavelength division multiplexing-mode division multiplexing [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 758-761.
- [23] ALLEGRE O J, PERRIE W, EDWARDSON S P, *et al.* Laser microprocessing of steel with radially and azimuthally polarized femtosecond vortex pulses [J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(8): 085601.
- [24] HAN D D, LIU X M. Sideband-controllable mode-locking fiber laser based on chirped fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 27045-27050.
- [25] LI J, WANG Y, LUO H, *et al.* Kelly sideband suppression and wavelength tuning of a conventional soliton in a Tm-doped hybrid mode-locked fiber laser with an all-fiber Lyot filter[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 103-109.
- [26] 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.