

全光纤超快矢量光场的产生与研究进展

王腾, 陆佳峰, 黄译平, 孟令浩, 石帆, 曾祥龙*

上海大学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,
上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444

摘要 对模式选择耦合器、声致光纤光栅等全光纤模式转换器件的工作原理进行总结,并结合锁模光纤激光器和模式转换器件的优势,简单高效地产生了超快矢量光束和涡旋光束,得到的超快高阶模式激光具有峰值功率高、模式纯度高等特点。实验证明了模式转换器件的快速响应特性和宽带模式转换特性,并指出了其未来的发展方向和应用前景。

关键词 光纤激光器; 超快光学; 高阶模式; 模式选择耦合器; 声致光纤光栅

中图分类号 TN248; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0508010

Generation and Research Progress of All-Fiber Ultrafast Vector Optical Fields

Wang Teng, Lu Jiafeng, Huang Yiping, Meng Linghao, Shi Fan, Zeng Xianglong*

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

Abstract This paper summarizes the working principles of all-fiber mode converters such as mode selective couplers and acoustically-induced fiber gratings. Combining the advantages of a mode-locked fiber laser and mode converters is a simple and effective method to generate ultrafast vector beams and optical vortex beams. The generated ultrafast laser with high-order modes (HOMs) has high peak powers and high mode purity. The experimental results demonstrate that the fast response and broadband mode conversion characteristics of these mode converters. In addition, the future development directions and application prospects of ultrafast HOMs are discussed.

Key words fiber lasers; ultrafast optics; high-order mode (HOM); mode selective coupler; acoustically-induced fiber grating

OCIS codes 140.7079; 140.4050; 140.3510

1 引 言

矢量光场是指场强具有中空环形分布、偏振在空间上非均匀分布的柱矢量光束,包括径向偏振光束、角向偏振光束和涡旋光束等^[1-3]。径向偏振光束是指偏振态呈径向分布的矢量光束;角向偏振光束是指偏振态呈角向分布的矢量光束;涡旋光束是指具有螺旋形相位波前、同时每个光子携带轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)的矢量光束,也叫 OAM 模式^[4-6]。由于柱矢量光束偏振的各向异性 and 涡旋光束拓扑荷数的量子化特性,在大容

量多维复用通信、量子计算、光学微操控、材料加工、激发表面等离子体以及超高分辨率成像等诸多领域有着广泛的应用前景^[7-15]。具有特殊强度、相位和偏振分布的超快矢量光场,相比于传统的超快高斯光场,在与物质相互作用时可以产生新的物理效应,为研究光场与物质相互作用提供了新的思路,为激光诱导材料科学提供了新的物理视角,极大地丰富和发展了人们对自然世界的认识以及对科学技术的利用。

目前超快矢量光场的产生主要基于对固体激光器输出的光束进行空间相位调制来产生涡旋光场,

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-02-18; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(91750108)、上海市国际科技合作基金项目(16520720900)

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

而基于光纤激光器的矢量光场产生研究刚刚兴起。2010年,中国科学院上海光学精密机械研究所的Lin等^[16-17]提出径向偏振调Q掺镱光纤激光器,实现了纳秒级别的矢量光束输出。2011年,日本千叶大学的Koyama等^[18]在大模场掺镱增益光纤中利用空间离轴耦合技术产生高阶模式和模式抑制,对光纤施加压力来获取高阶模场,实现纳秒脉冲输出。2012年,中国科学技术大学的Sun等^[19]利用少模光纤错位熔接法激发高阶模式和布拉格光栅选模,实现了低阈值、单波长、全光纤柱矢量激光器,能够产生模式纯度高达94%的径向和角向偏振的柱矢量光束。2014年,香港城市大学的Dong等^[20]基于非线性偏振旋转锁模,利用光纤错位熔接法和布拉格光纤光栅搭建了光纤激光器,实现了皮秒量级的柱矢量光束输出。但因为布拉格光纤光栅的窄反射带宽,限制了柱矢量光脉冲的频谱带宽,并且其转换效率受到极大限制,具有快速响应的宽带模式转换器件研究以及更短脉冲矢量光场的产生是目前光学领域的研究前沿。

本文对模式选择耦合器和声致光纤光栅的工

作原理进行总结,并通过这些模式转换器件与超快光纤激光器结合开展全光纤超快矢量光场产生的理论与实验研究。基于相位匹配技术和激光锁模技术,实现了全光纤激光结构产生锁模短脉冲的高阶矢量光束。该实验结果不仅验证了模式选择耦合器的宽带模式转换特性,加深了对光纤激光系统中高峰值功率、超短矢量光场脉冲产生过程的理解,还有助于探索矢量光场与非线性介质相互作用的物理机制。

2 光纤模式理论简介

根据麦克斯韦理论,光场的电场强度和磁场强度在光纤中以特定的分布稳定传输,称之为模式。以阶跃型折射率分布的4模光纤为例,其支持的标量模式主要有 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 等模式,对应的矢量模式是 $\{HE_{11}^{even}, HE_{11}^{odd}\}$, $\{TM_{01}, HE_{21}^{even}, HE_{21}^{odd}, TE_{01}\}$, $\{HE_{31}^{even}, HE_{31}^{odd}, EH_{11}^{even}, EH_{11}^{odd}\}$ 。其中 LP_{01} 模式是基模,其余2组分别为一阶和二阶高阶模式。标量模式、矢量模式和OAM模式之间的对应关系如图1所示^[21-22]。

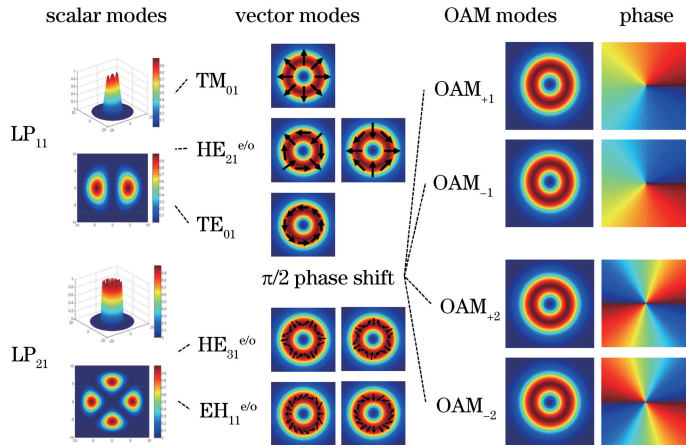


图1 4模光纤中的模式及相互之间的关系^[21]

Fig. 1 Mode groups in 4-mode fiber and their relationships^[21]

矢量模式,也叫本征模式,是光纤中麦克斯韦方程组的特征解。但是常用的光纤是弱导光纤,其纤芯和包层的折射率非常接近,在弱导近似条件下解麦克斯韦方程组得到的是标量模式,即LP模式(Linearly Polarized Mode)。 LP_{01} 模式的简并度为2,是由2个传播常数接近的矢量模式简并而成。 LP_{11} 、 LP_{21} 等高阶模式均由4个矢量模式简并而成。涡旋光束可以由螺旋相位板(Spiral Phase Plate, SPP)、空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)等空间方法产生,也可以在光纤中由几个矢

量模式引入 $\pi/2$ 的相位差后产生^[23-26]。通过拓扑荷数的大小和正负来表征涡旋光束带有轨道角动量的多少和方向,拓扑荷数定义为其在一个波长的扭转次数,扭转方向是顺时针则为正数,逆时针则为负数,拓扑荷越大表示光沿轴旋转得越快^[27]。相位奇点是光场中的零点,场中的相位会沿着零强度的点旋转。正是由于涡旋光束具有相位奇点、多种空间偏振态、无限种相互正交的本征态等特性,它在很多场景中具有潜在的应用价值,并受到越来越多的关注。

3 模式转换器件

3.1 模式选择耦合器的工作原理及制作过程

模式选择耦合器 (Mode Selective Coupler, MSC) 是一种用单模光纤和少模光纤制作的器件, 能够实现基模到高阶模式的转换, 而且转换后模式纯度高, 模间串扰低, 在模分复用和传感系统中有重要的应用, 模式选择耦合器的示意图如图 2 所示。根据光纤模式耦合理论, 模式选择耦合器中的模式耦合方程可以描述为^[28-30]

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = i(\beta_1 + C_{11})A_1 + iC_{12}A_2, \quad (1)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = i(\beta_2 + C_{22})A_2 + iC_{21}A_1, \quad (2)$$

式中, z 为光在耦合区的传播距离, A_1 和 A_2 分别为单模光纤和少模光纤中光场的强度, β_1 和 β_2 分别是单模光纤中基模的传播常数和少模光纤中特定高阶

模式的传播常数, 只有当 $\beta_1 = \beta_2$ 时, 才满足相位匹配条件, 此时单模光纤中的基模能够耦合到少模光纤中的高阶模式。 C_{11} 、 C_{22} 、 C_{12} 和 C_{21} 分别为自耦合系数和互耦合系数。相比于互耦合系数, 自耦合系数太小, 可以忽略, 并且 $C_{12} \approx C_{21} \approx C$, 系数 C 的大小与耦合区光纤的长度和粗细相关。通过计算, 耦合区中单模光纤和少模光纤中的能量分布为

$$P_1(z) = |A_1(z)|^2 = 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \quad (3)$$

$$P_2(z) = F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \quad (4)$$

式中, $F = \left[1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4C^2}\right]^{-1/2}$, F^2 为两个光纤的最大耦合功率。通过(3)~(4)式, 可以看出能量在光纤的耦合区中进行周期性的交换。当光的传播距离等于耦合距离时, 单模光纤中的基模正好全部耦合到少模光纤中特定的高阶模式。

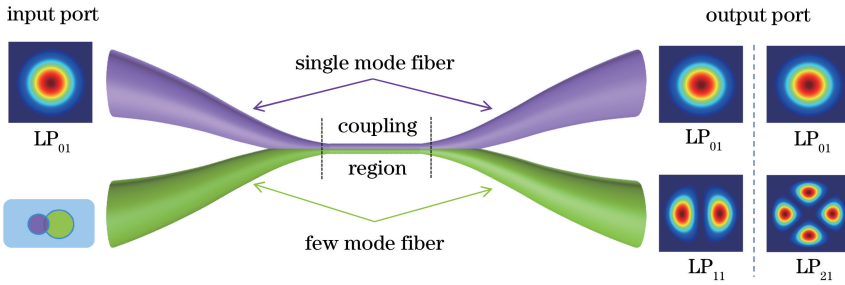


图 2 模式选择耦合器示意图

Fig. 2 Schematic of mode selective coupler

模式选择耦合器的基本原理是通过合适的参数设计, 使单模光纤中的基模和少模光纤中的一个高阶模进行相位匹配, 即模式的有效折射率相等, 以此在少模光纤中耦合出特定的高阶模式^[28-35]。模式的有效折射率不仅与光纤的材料折射率、光束的波长相关, 还与光纤的结构相关。因此, 可以通过熔融拉锥来减小光纤直径, 使模式的有效折射率减小, 当单模光纤中基模的有效折射率和少模光纤中特定高阶模的有效折射率相等时, 就可以在模式选择耦合器的少模输出端耦合出特定高阶模式。为了获得较高的模式质量, 通过弱熔融拉锥技术使光纤结构在拉锥过程中保持完整并满足光纤直径匹配。这种方法制作的模式选择耦合器在耦合区是以拉锥后的光纤包层为波导, 以空气为包层。以 1550 nm 波段为例, 光纤包层折射率为 1.444, 空气折射率为 1, 单模光纤 (纤芯/包层直径为 8.2/125 μm) 中基模的有效折射率和少模光纤 (纤芯/包层直径为 18.5/125 μm) 中各个高阶模式的有效折射率与光纤包层

半径的关系, 如图 3(a) 所示。从图中可以看到, 不同阶数模式的有效折射率随着光纤直径的减小而减小, 当单模光纤直径为 10 μm (8 μm), 少模光纤直径为 16.1 μm (17.8 μm) 时, 单模光纤中的基模与少模光纤中的 LP_{11} (LP_{21}) 模式的有效折射率相等。把相关参数代入到仿真软件 Rsoft 中, 用波束传播法对模式选择耦合器进行仿真, 得到的仿真结果如图 3(b)~(e) 所示, 可以看出单模光纤中的基模能够有效地耦合到少模光纤中的 LP_{11} (LP_{21}) 模式。

由仿真结果可知, 当单模光纤和少模光纤的直径比为 0.62 和 0.45 时, 能够分别耦合出 LP_{11} 模和 LP_{21} 模。因此, 需要对单模光纤进行预拉, 当光纤直径预拉到 78 μm 、56 μm 时, 再分别和少模光纤熔融拉锥, 能够制作出 LP_{11} 模式选择耦合器和 LP_{21} 模式选择耦合器。实验结果如图 4 所示, 图 4(a) 显示 LP_{11} 和 LP_{21} 模式选择耦合在 1520、1550、1580 nm 波长处少模光纤输出端的模场图, 表明制作的模式选择耦合器能够在 60 nm 的带宽范围内进行有效

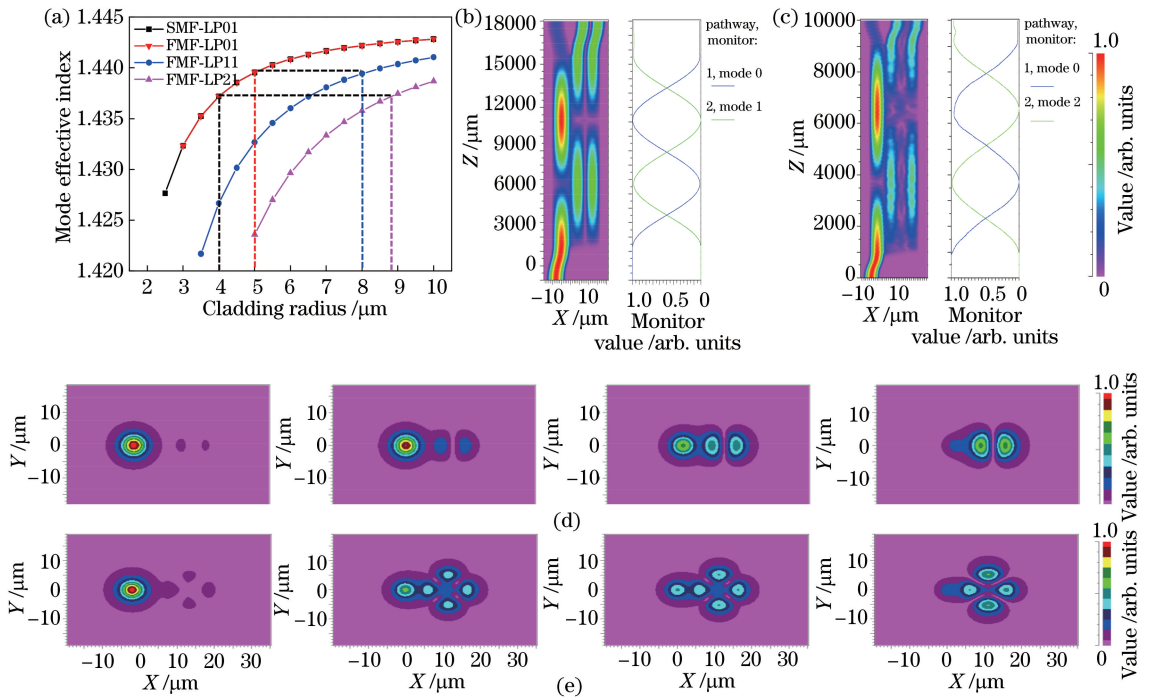


图 3 模式选择耦合器仿真结果图。(a) 相位匹配图；(b)(c) 能量耦合图；(d)(e) 模场演变图

Fig. 3 Simulation results of mode selective coupler. (a) Phase-matching curves; (b)(c) energy coupling diagrams; (d)(e) evolution of mode field distribution

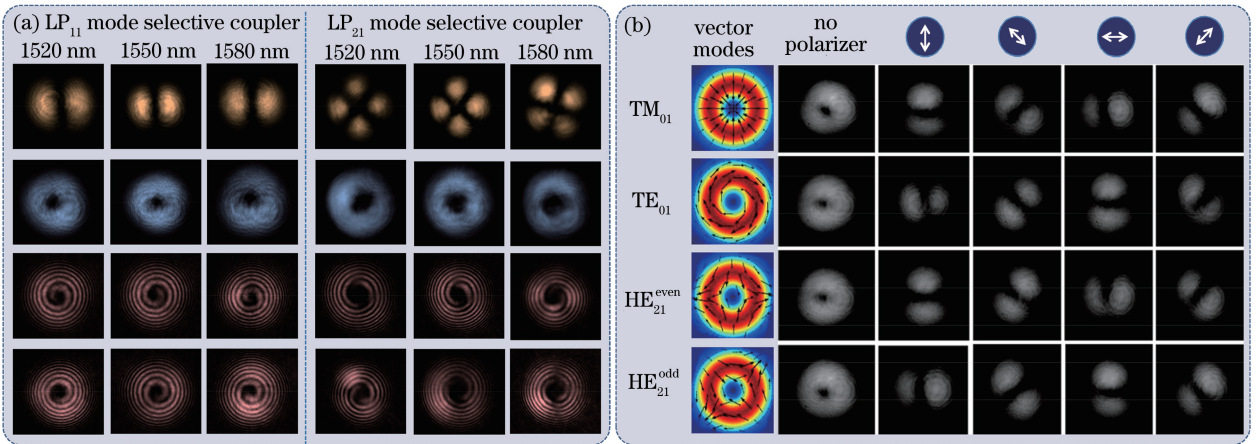


图 4 模式选择耦合器实验结果图。(a) 涡旋光束；(b) 矢量光束

Fig. 4 Experimental results of mode selective coupler. (a) Optical vortex beams; (b) vector beams

的模式转换。当用一个挤压式偏振控制器挤压和旋转少模光纤，使光纤中的矢量模式产生 $\pi/2$ 的相位差时，对应的涡旋光束也能够产生，如图 4(a) 中第 2 行所示。涡旋光束携带轨道角动量的大小和方向是通过涡旋光和高斯光的干涉来检测的，检测结果如图 4(a) 中第 3 行和第 4 行所示，表明成功激发出 ± 1 阶和 ± 2 阶的 OAM 模式。在 LP_{11} 模式选择耦合器的少模光纤输出端，通过偏振控制器的挤压和旋转，也可以调整 LP_{11} 模中矢量模式的耦合过程，使所有的矢量模式有效地耦合到某一个矢量模式，

从而得到柱矢量光束，实验结果如图 4(b) 所示，通过检偏器检测输出光束的偏振态，可以确定产生的矢量光束分别为 TM_{01} , TE_{01} , HE_{21}^{even} , HE_{21}^{odd} 模式。

同样，在 1064 nm 波段，模式选择耦合器也能进行有效的模式转换，仿真和实验结果如图 5(a) 所示^[36]。当单模光纤(纤芯/包层直径为 6.2/125 μm) 预拉到 102、79、52 μm 时，再分别与少模光纤(纤芯/包层直径为 18.5/125 μm) 熔融拉锥，单模光纤中的基模可以有效耦合到少模光纤中的高阶模式。从图中可以看到， LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 等 3 个高阶模式

被成功激发出来。测得的转换效率分别为 94.2%、86%、26.1%，插入损耗分别为 0.26、1.3、3.1 dB。同样地，通过偏振控制器在少模光纤输出端进行挤压和旋转，柱矢量光束和涡旋光束也能被成功激发出来，如图 5(b)和 5(c)所示。相对于基模，高阶模式

的弯曲损耗很大，因此，可以使用弯曲损耗的方法对产生的高阶模式的纯度进行测量^[36]。实验中，把少模光纤缠绕成直径大约 1 cm 的圆环，测得的模式纯度均高达 93%以上。

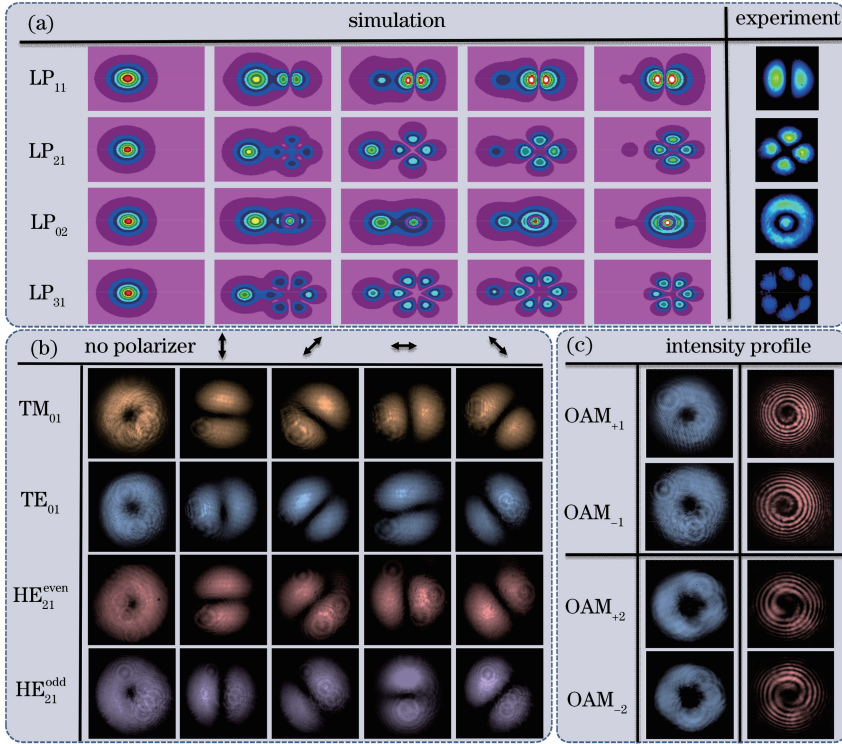


图 5 1064 nm 模式转换的仿真和实验结果图。(a)模场演变图；(b)矢量光束；(c)涡旋光束^[36]

Fig. 5 Simulation and experimental results of 1064 nm mode conversion. (a) Evolution of mode field distribution; (b) vector beams; (c) optical vortex beams^[36]

3.2 声致少模光纤光栅的工作原理及制作过程

声致光纤光栅 (Acoustically-Induced Fiber Grating, AIFG) 利用声波在光纤中的声光效应来产生周期性的折射率调制，在光纤内部形成声致光纤光栅，能够实现基模到高阶纤芯模式或包层模式转换，也可实现可调谐模式耦合与模式滤波^[37-39]。声波主要靠电调制压电换能器 (Piezoelectric Transducer, PZT) 来实现，通过电压放大器对信号发生器生成的正弦波或者矩形波进行放大，然后用放大的电信号驱动压电换能器产生声波，振动的声波再通过超声聚能器传至光纤中。声致光纤光栅的周期与声波的频率相关，声光调制强度直接影响模式耦合效率，因此通过改变声波的频率和振幅，可以改变声致光纤光栅的工作波段与模式耦合效率。凭借结构简单、波长调谐范围宽、响应速度快、插入损耗低等优点，声致光纤光栅在光纤通信、光纤激光器和光纤传感等领域具有广泛的应用^[37-43]。

少模光纤声光可调谐模式转换器是利用声致光纤光栅来进行模式转换的器件，根据声光效应的波导模式耦合理论，基于声致光纤光栅的模式转换需要满足特定的相位匹配条件。声致光纤光栅中基模到 LP₁₁ 模式转换的相位匹配条件为 $L_B = \Lambda$ ，即拍长 L_B 和声致光纤光栅的周期 Λ 相等。拍长 $L_B = \lambda / (n_1 - n_2)$ ，其中 λ 是传输光波长， n_1 是基模的有效折射率， n_2 是 LP₁₁ 模式的有效折射率。声致光纤光栅的周期 $\Lambda = 2\pi/k = \sqrt{\pi r_{cl} C_f / f}$ ， r_{cl} 是光纤包层半径， C_f 是光纤中声波的传输速度， f 是光纤中声波信号的频率^[41]。实验装置如图 6(a)所示。

实验中，使用的少模光纤为 4 模光纤 (纤芯/包层直径为 18.5/125 μm)。拍长与波长的关系以及在不同波长下信号频率与光栅周期的关系如图 6 (b)所示，当信号发生器的频率为 742.0 kHz，能够在少模光纤中产生周期为 1234 μm 的声致长周期光栅。少模光纤有一定的椭圆度，导致 LP_{11a} 和 LP_{11b}

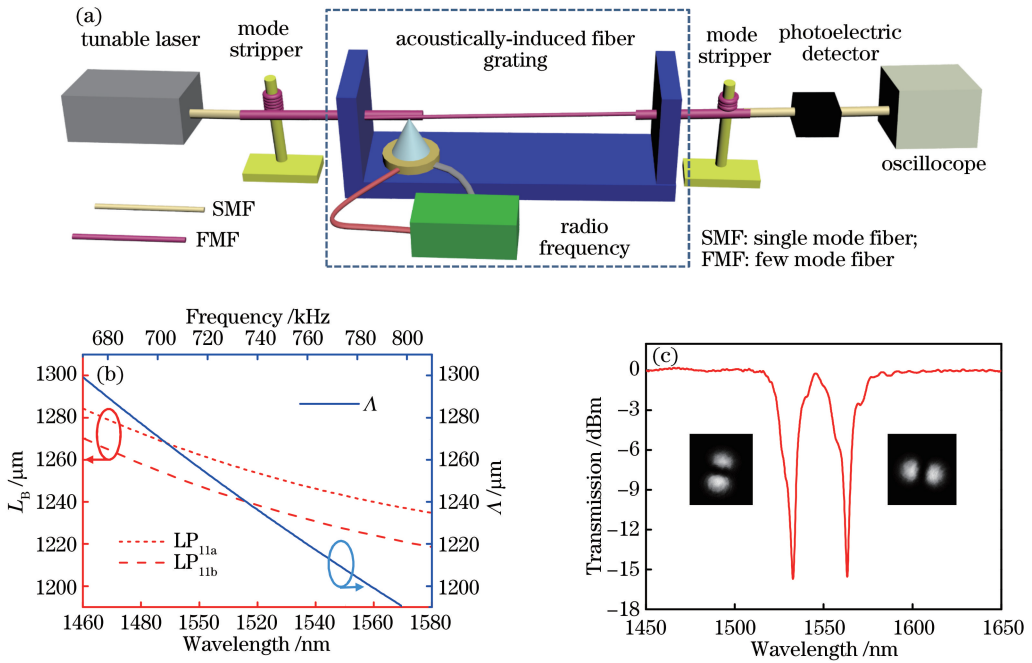


图 6 声致少模光纤光栅示意图。(a)实验装置图；(b) LP_{11a} 模式和 LP_{11b} 模式的拍长以及声致光纤光栅周期和应用频率之间的关系；(c) 双峰传输谱^[41]

Fig. 6 Schematic of acoustically-induced few-mode fiber grating. (a) Schematic of experimental setup; (b) beat length of LP_{11a} mode and LP_{11b} mode, and relationship between grating period and applied frequency; (c) dual-resonant transmission spectrum^[41]

模式的有效折射率不同,在传输谱上可以看到双峰响应,对应的模式分别为 LP_{11a} 、 LP_{11b} 模式,且 2 个模式的转换效率均超过 15 dB,如图 6(c)所示。图 6(c)中的插图表示的是产生的 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式的模场图。实验结果表明通过声致少模光纤光栅能够实现高效率、高纯度的模式转换。

4 实验装置及实验结果

4.1 基于模式选择耦合器和掺铒光纤激光器的超快矢量光场产生

为了在全光纤系统中产生超快矢量光场,研究人员尝试将锁模光纤激光器和模式转换器件进行结合。西北工业大学的 Mao 等^[44-45]以碳纳米管为可饱和吸收体,使用错位熔接技术激发高阶模式,产生了 6.87 ps 的矢量光场。中国科学技术大学的 Sun 等^[46-48]基于少模光纤布拉格光栅和碳纳米管可饱和吸收体实现了纳秒级别的矢量光束的产生。南京邮电大学的 Wan 等^[49-50]以模式选择耦合器为模式转换器件,基于非线性偏振旋转锁模机制,在 8 字腔的掺铒光纤激光器中实现了 17 ns 的柱矢量光束输出。该课题组还通过在光纤激光器腔内加入双折射光纤滤波器,实现多波长矢量光束锁模脉冲输出^[51-52]。南开大学的 Guo 等^[53]基于少模长周期光

纤光栅模式转换器件和非线性偏振旋转锁模机制实现了 970 fs 的柱矢量光束输出。但是,基于错位熔接技术的效率太低,模式纯度不高,基于光纤光栅的方法,转换带宽窄,难以对超短脉冲进行模式转换。

本课题组结合非线性偏振旋转锁模光纤激光器的超短脉冲特性,将模式选择耦合器接入到光纤激光器谐振腔中,将其作为宽带模式转换和能量耦合器件,成功实现了飞秒量级柱矢量光束和涡旋光脉冲的输出。实验装置如图 7 所示,高浓度商用掺铒光纤作为增益介质(Er80-8/125, LIEKKI, 芬兰)置于激光谐振腔中,980 nm 半导体激光器通过波分复用器与掺铒光纤进行连接,为谐振腔不断提供能量。偏振相关隔离器使激光在谐振腔中单向运转,腔内的 2 个偏振控制器(Polarization Controller, PC)用来调整激光的偏振态。腔内的能量通过耦合器进行输出,分光比为 80:20 的光纤耦合器作为监测端,用于检测激光器的运行状态,模式选择耦合器用于提取谐振腔的能量,并作为模式转换器件。当光纤激光器处于锁模状态时,激光器腔内能够产生飞秒基模脉冲,利用模式选择耦合器的宽带模式转换特性,在激光器的输出端产生飞秒的高阶模式,并通过调整腔外偏振控制器的状态,使模式选择耦合器少模

输出端的飞秒 LP₁₁ 模式光束转换为矢量光束。使用这种方法能够简单、高效地产生高质量的超快矢

量光束,脉冲峰值功率高、光谱宽,在模分复用、材料加工等领域具有重要的应用前景。

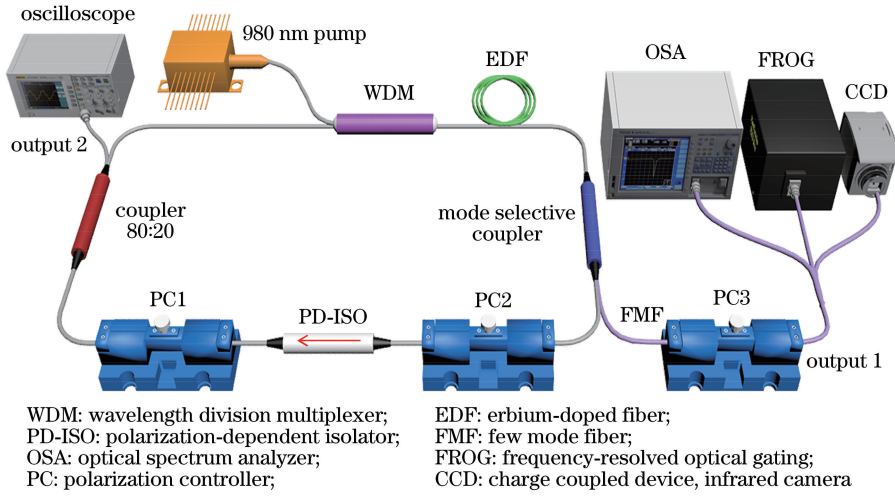


图 7 基于模式选择耦合器的超快矢量光场产生实验装置图^[29]

Fig. 7 Experimental setup for ultrafast vector optical field generation based on mode selective coupler^[29]

通过示波器和光谱仪记录柱矢量光脉冲的相关信息。图 8(a)和(b)分别表示输出端 output 1 和 output 2 在锁模状态下的光谱,两个输出光谱的差异是由脉冲在腔内的非线性偏振旋转演化和模式选择耦合器的传输谱引起的,因为谐振腔的净色散为负值,因此在其光谱中观察到了凯利边带。少模光纤输出端 output 1 输出光谱对应的 3 dB 带宽为 12.5 nm。图 8(c)是用示波器检测的脉冲序列示意图,其重复频率为 30.54 MHz,使用商用的频率分辨

光学开关 (Frequency-Resolved Optical Gating, FROG)测得的脉宽为 300 fs。图 8(d)是输出功率与抽运功率的关系图,当抽运功率达到 220 mW 时,通过示波器观察到锁模脉冲的输出,三角代表 output 1 输出端,圆点代表 output 2 输出端;当抽运功率为 620 mW 时,得到的最大输出功率分别为 9.8 mW和4.3 mW。经过计算,最大单脉冲能量是 0.32 nJ,峰值功率可达 1.07 kW。在同一抽运功率下, output 1 的输出能量要大于 output 2。这是因

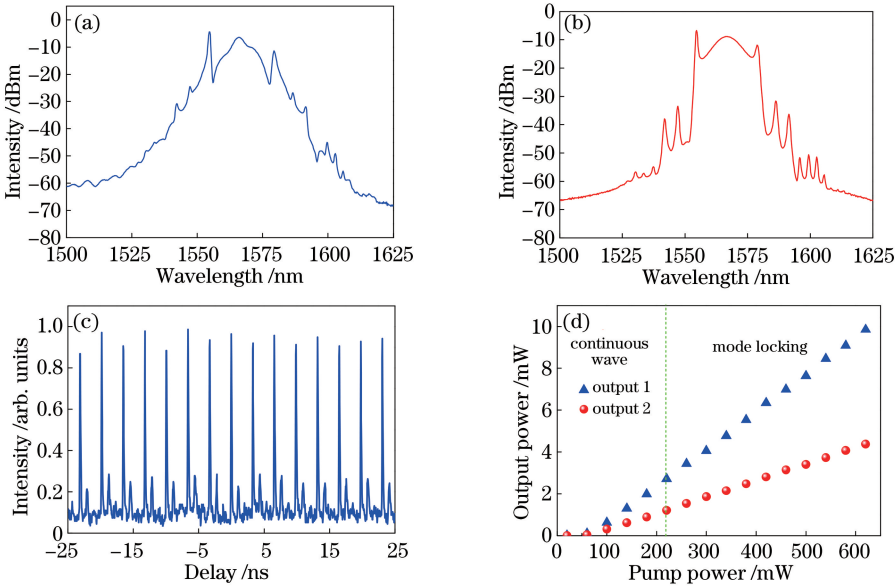


图 8 飞秒矢量光束实验结果图。(a) output 1 的输出光谱图;(b) output 2 的输出光谱图;
 (c) 脉冲序列;(d)输出功率和抽运功率的关系^[31]

Fig. 8 Experimental results of femtosecond vector beams. (a) Output spectrum of output 1; (b) output spectrum of output 2; (c) pulse train; (d) relationship between output power and pump power^[31]

为在图 7 中,激光沿光隔离器箭头方向进行振荡,在锁模脉冲的形成过程中,偏振相关隔离器会选择能量高的偏振态的光通过,并隔离一部分能量较弱的光,因此经过隔离器的光的能量相较于之前会降低,使得从普通单模耦合器输出端的能量小于模式选择耦合器的输出端能量。

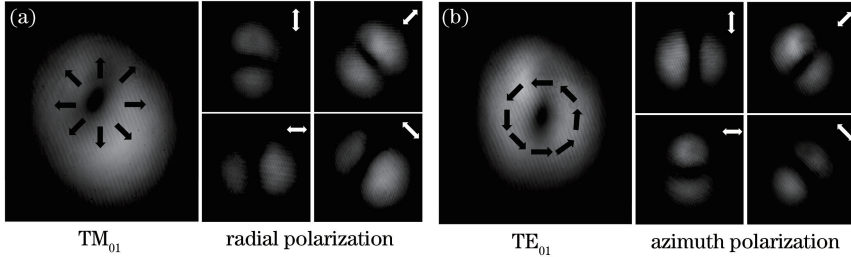


图 9 飞秒矢量光束模场图。(a) TM_{01} 模场图;(b) TE_{01} 模场图^[31]

Fig. 9 Mode fields of femtosecond vector beams. (a) Mode field of TM_{01} mode; (b) mode field of TE_{01} mode^[31]

为了验证模式选择耦合器的宽带模式转换特性,需要更宽光谱的锁模脉冲,在光纤激光器谐振腔中加入 1.5 m 长的色散补偿光纤,使谐振腔的净色散为正值。当光纤激光器处于锁模状态时,能够得到约 60 nm 宽的锁模脉冲。通过调整腔外偏振控制器的压力和角度,使少模光纤中的超快本征模式产生 $\pi/2$ 的相位差,就得到飞秒的涡旋光束。当使用 LP_{11} 模式选择耦合器时,可以产生 273 fs 的一阶

使用红外 CCD 观察飞秒矢量光束的模场分布图,测得的结果如图 9(a)和 9(b)所示。通过检偏器来检测输出光束的偏振态,可以看到,和 LP_{11} 模式类似的光斑随着检偏器偏振方向的旋转而旋转。因此,可以确认它们分别是 TM_{01} 模和 TE_{01} 模。

涡旋光束,对应的 3 dB 带宽是 56.5 nm,光谱仪测得的光谱图如图 10(a)所示;当使用 LP_{21} 模式选择耦合器时,可以产生 140 fs 的二阶涡旋光束,对应的 3 dB 带宽是 67.7 nm,光谱仪测得的光谱图如图 10(b)所示。图 10(c)展示的是二阶涡旋光束的脉冲序列,其重复频率为 36.10 MHz。输出功率与抽运功率的关系如图 10(d)所示。经过计算,最大单脉冲能量是 0.36 nJ,峰值功率可达 2.6 kW。

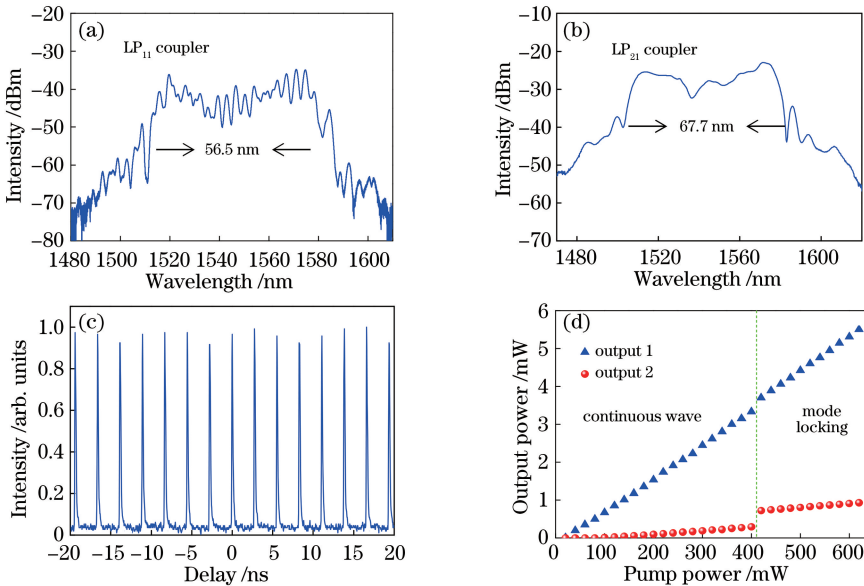


图 10 超快涡旋光束实验结果图。(a) LP_{11} 耦合器的输出光谱图;(b) LP_{21} 耦合器的输出光谱图;

(c) 脉冲序列;(d) 输出功率和抽运功率的关系^[29]

Fig. 10 Experimental results of ultrafast optical vortex beams. (a) Output spectrum of LP_{11} coupler;

(b) output spectrum of LP_{21} coupler; (c) pulse train; (d) relationship between output power and pump power^[29]

在光纤激光器处于稳定锁模的状态下,使用红外 CCD 观察输出端 output 1 的模场分布图,测得的结果

如图 11 所示。第一行表示的是 LP_{11} 模式选择耦合器接入到光纤激光器中后输出的模场图,分别是 LP_{11} 模

式、 $OAM_{\pm 1}$ 模式、以及对应的涡旋光束和高斯光束的干涉图。第二行表示的是 LP_{21} 模式选择耦合器接入到光纤激光器中后输出的模场图，分别是 LP_{21} 模式、

$OAM_{\pm 2}$ 模式、以及对应的涡旋光束和高斯光束的干涉图。从模场图可以看出，锁模光纤激光器成功产生了拓扑荷数为 ± 1 、 ± 2 的飞秒涡旋光束。

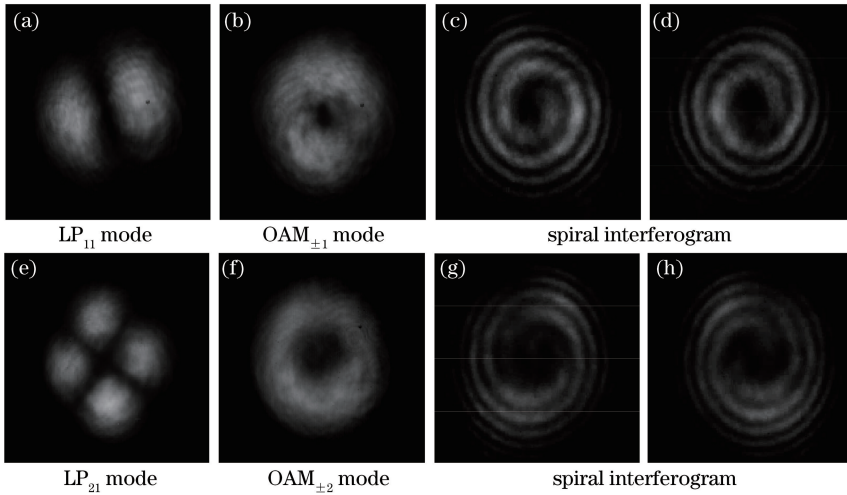


图 11 超快涡旋光束模场图。(a) LP_{11} 模式；(b) $OAM_{\pm 1}$ 模式；(c)(d) LP_{11} 对应的涡旋干涉图；(e) LP_{21} 模式；(f) $OAM_{\pm 2}$ 模式；(g)(h) LP_{21} 对应的涡旋干涉图^[29]

Fig. 11 Mode fields of ultrafast optical vortex beams. (a) LP_{11} mode; (b) $OAM_{\pm 1}$ mode;

(c)(d) spiral interferograms of LP_{11} ; (e) LP_{21} mode; (f) $OAM_{\pm 2}$ mode; (g)(h) spiral interferograms of LP_{21} ^[29]

4.2 基于模式选择耦合器和掺镱光纤激光器的超快矢量光场产生

与掺铒光纤相比，掺镱光纤的能级结构简单，利用掺镱光纤研制的光纤激光器具有较高的斜率效率和光光转换效率，可以在 $1 \mu\text{m}$ 波段得到高功率的激光输出。南安普顿大学的 Lin 等^[54]用掺镱光纤主控振荡器功率放大器 (Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA) 实现了纳秒级别的柱矢量光束输出。上海科学技术大学的 Huang 等^[55]通过半光纤半空间的激光腔设计，实现了可控的高纯度皮秒量级矢量光场的产生。南京邮电大学的 Wang

等^[56-58]基于模式选择耦合器和掺镱光纤激光器，分别以声光调制器为调 Q 元件与半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 为锁模器件，实现了纳秒量级的柱矢量光束的产生。但是，更高效率、更短脉冲、更高阶模式超快矢量光场的产生仍需实验研究。

本课题组基于模式选择耦合器和非线性偏振旋转锁模技术在掺镱光纤激光器中得到了 $1 \mu\text{m}$ 波段的超快高阶模式脉冲，并实现了 LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 等 3 个高阶模式的产生。实验装置如图 12 所示，掺镱光纤 (YDF, Yb1200-4/125, LIEKKI, 芬兰) 的长度为 0.25 m ，腔内所有的光纤是单模光纤 (HI-

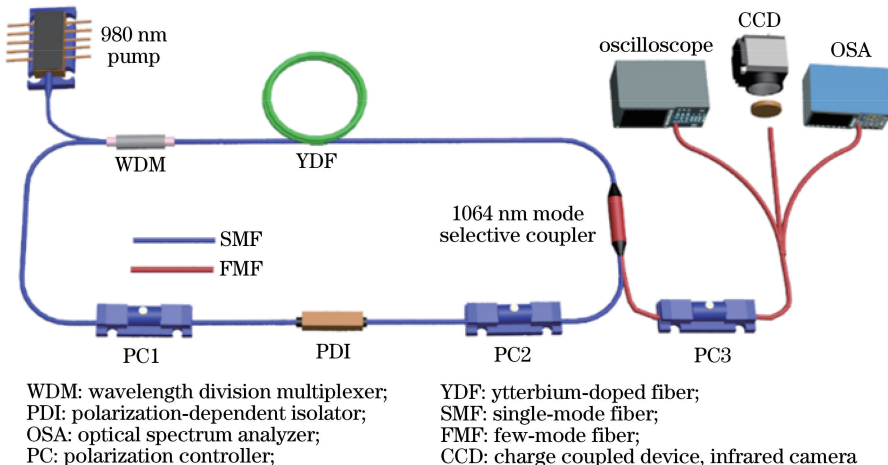


图 12 $1 \mu\text{m}$ 超快 HOM 脉冲产生实验装置图^[36]

Fig. 12 Experimental setup for $1 \mu\text{m}$ ultrafast HOM pulse generation^[36]

1060, Corning, 美国), 总腔长为 7.9 m ^[36]。1064 nm 的模式选择耦合器作为能量耦合输出和模式转换器件接入到环形腔内。通过调整腔内的 2 个偏振控制器, 使光纤激光器处于锁模状态, 在输出端就能得到超快高阶模式脉冲。

将分光比为 17%、21%、15% 的 LP_{11} 、 LP_{02} 、 LP_{21} 模式选择耦合器接入到 1064 nm 激光器腔内,

能够得到 3 种高阶模式的超快矢量光场, 实验结果如图 13 所示。三种锁模高阶模式脉冲对应的 3 dB 带宽分别为 14、15.5、18 nm。斜率效率分别为 31%、17.8%、6.1%, 重复频率均为 26 MHz, 和激光器的腔长是对应的。其中最大输出光功率可达 76 mW, 最大斜率效率为 31%, 远远大于目前少模激光器的斜率效率, 实现了少模输出功率的优化。

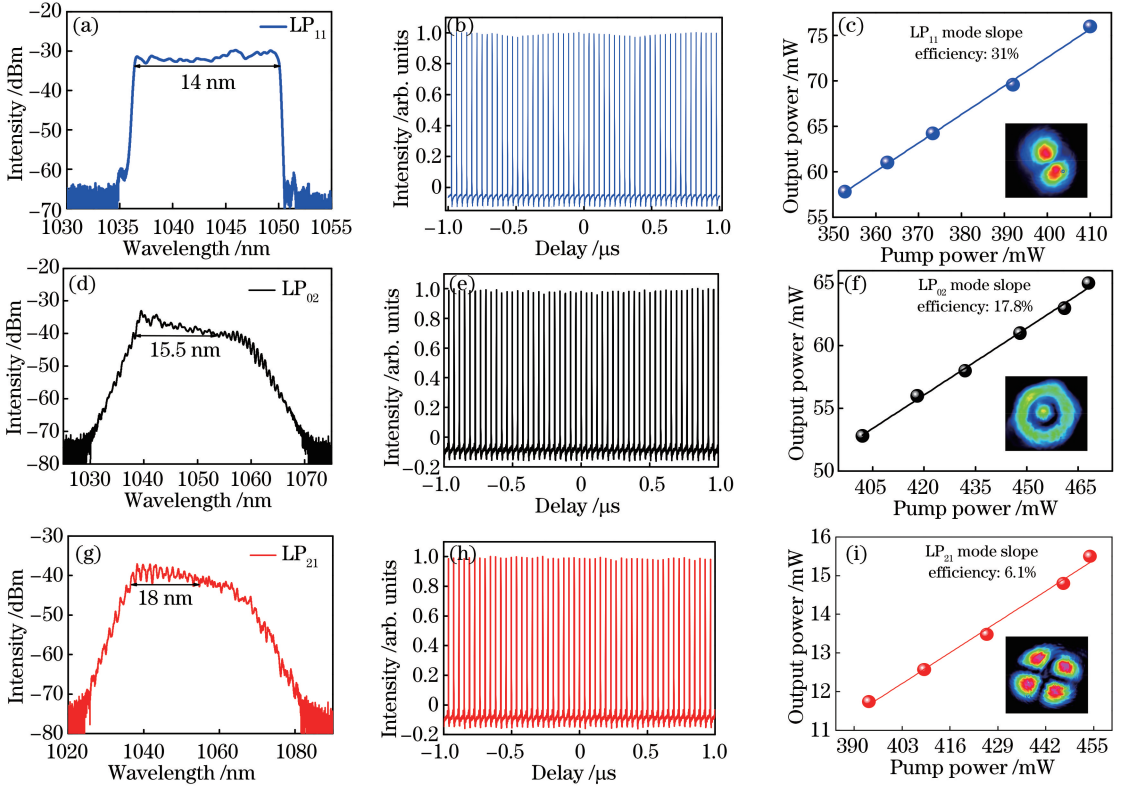


图 13 $1 \mu\text{m}$ 超快 HOM 脉冲实验结果图。(a)~(c) LP_{11} 模式、(d)~(f) LP_{02} 模式、(g)~(i) LP_{21} 模式的输出光谱(左)、脉冲序列(中)、斜率效率(右)^[36]

Fig. 13 Experimental results of $1 \mu\text{m}$ ultrafast HOM pulses. Output spectra (left), pulse trains (middle), and slope efficiencies (right) of (a)-(c) LP_{11} mode, (d)-(f) LP_{02} mode, and (g)-(i) LP_{21} mode^[36]

4.3 基于声致光纤光栅和光纤激光器的超快矢量光场产生

基于声致光纤光栅的模式转换器具有工作波长、转换效率灵活可调的特点, 并能实现基模和高阶模式的快速切换, 接入到锁模光纤激光器中, 能够实现模式可切换的超快高阶模场的产生。为了得到较高的转换效率和模式纯度, 在线性腔光纤激光器腔内接入声致光纤光栅是非常理想的方案。西北工业大学的 Zhang 等^[42] 以声致光纤光栅为模式转换器件, 在光纤激光器中实现了连续的柱矢量光束的产出。但是基于声致光纤光栅进行模式转换, 如何产生具有高峰值功率的超短矢量脉冲还有待继续研究。

以 Sb_2Te_3 为可饱和吸收体的线性腔锁模光纤激光器和以声致光纤光栅为模式转换器件的高阶模

场产生实验装置如图 14 所示^[59]。当激光器处于锁模状态时, 通过改变信号发生器的频率, 成功输出 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式脉冲, 并能随信号频率的切换而切换, 信号频率分别为 753 kHz 和 738 kHz。切换的时间主要取决于声波在声致光纤光栅耦合区的传输耗时, 可通过表达式 $\tau = L / \sqrt{\pi \cdot R \cdot C_{\text{ext}} \cdot f}$ 来计算。其中, L 是声致光纤光栅耦合区的长度 (25 cm), R 为光纤半径, C_{ext} 是声速, f 是信号频率。经过计算, LP_{01} - LP_{11a} 和 LP_{01} - LP_{11b} 的切换时间分别为 0.271 ms 和 0.274 ms。脉冲高阶模式快速切换的实验结果如图 15 所示, LP_{11a} 模式脉冲的中心波长为 1550.32 nm, 3 dB 带宽为 0.22 nm, 脉冲间隔为 $0.538 \mu\text{s}$, 脉冲宽度为 28 ns, 斜率效率为

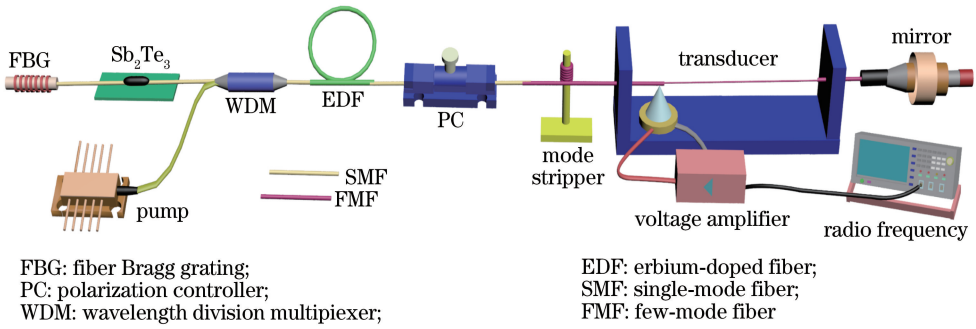


图 14 基于 AIFG 的超快高阶模场产生实验装置图^[59]

Fig. 14 Experimental setup for ultrafast HOM laser generation based on AIFG^[59]

11.3%，如图 15(a)、15(b)和 15(c)所示。LP_{11b} 模式脉冲的中心波长为 1550.28 nm，3 dB 带宽为 0.24 nm，脉冲间隔为 0.538 μs，脉冲宽度为 26 ns，斜率效率为 11.7%，如图 15(d)、15(e)和 15(f)所示。图 15(a)和 15(d)中的插图分别表示 LP_{11a} 和

LP_{11b}的模场图，图 15(c)和 15(f)中的插图分别表示 LP_{11a}和 LP_{11b}模式脉冲的单脉冲图。实验结果表明，基于声致光纤光栅和锁模光纤激光器的脉冲高阶模场成功产生并能进行快速的模式切换，其在模式和时间同时复用的光通信系统中具有重要的应用价值。

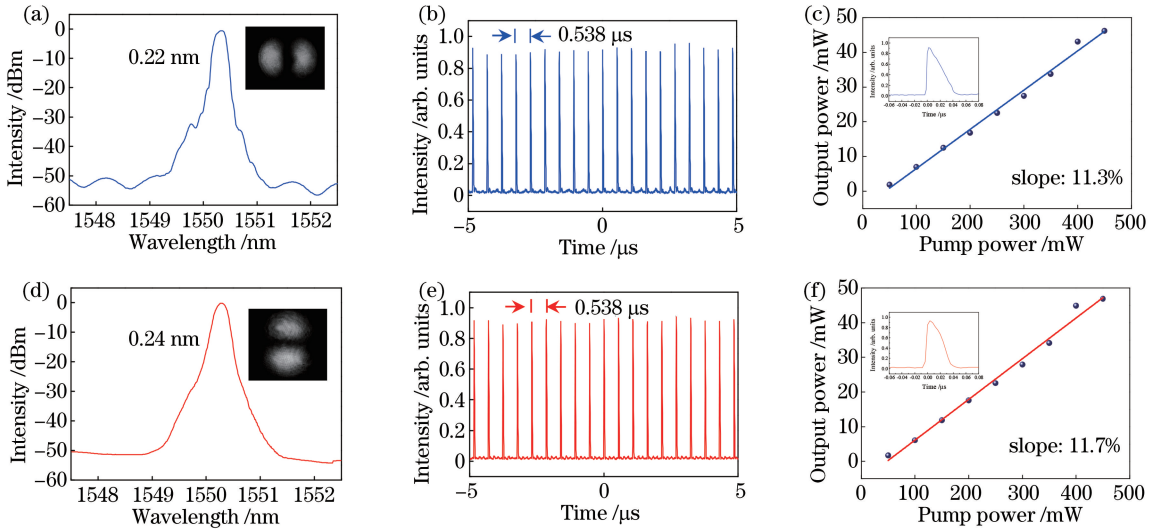


图 15 基于 AIFG 的超快高阶模场产生实验结果图。(a)~(c) LP_{11a} 模式和 (d)~(f) LP_{11b}模式的输出光谱(左)、脉冲序列(中)、斜率效率(右)^[59]

Fig. 15 Experimental results of ultrafast HOM laser generation based on AIFG. Output spectra (left), pulse trains (middle), and slope efficiencies (right) of (a)-(c) LP_{11a} mode and (d)-(f) LP_{11b} mode^[59]

5 结束语

对模式选择耦合器和声致光纤光栅的工作原理进行了总结，并通过这些模式转换器件与锁模光纤激光器结合开展超快矢量光场产生的理论与相应实验研究。基于相位匹配技术和激光锁模技术，实现了全光纤激光系统产生飞秒高阶矢量脉冲。该实验结果不仅验证了模式选择耦合器的宽带模式转换特性，还加深了对光纤激光系统中产生超短矢量光场脉冲过程的理解。通过对模式转换器件和光纤激光器的损耗以及激光器腔内的色散进行优化，能够得

到更高功率、更短脉冲的矢量光场。值得一提的是，基于模式选择耦合器和光纤激光器这种组合，不仅能产生超快矢量光束，还能产生窄线宽、多波长等非脉冲型矢量光束^[60-63]。除此之外，基于模式选择光子灯笼、错位熔接、少模长周期光纤光栅等模式转换器件来产生矢量光场的相关研究也有很多，并取得了不错的实验结果^[64-72]，相比于这些方法，模式选择耦合器的转换带宽宽、响应速度快、插入损耗低、结构简单。为了突破带宽和效率限制，得到更高质量的矢量光场，在光纤激光系统内直接进行高阶模式振荡和输出的研究已经开始。全少模光纤激光器以

及多模光纤激光器应运而生,这种新的方案不仅能高效地产生矢量光场,不受带宽限制,还能提供一个全新的实验平台,在非线性波束传播、随机光纤激光器、高功率光纤激光器以及时空锁模等研究领域具有重要的意义^[73-80]。因此,在光纤激光器腔内直接进行高阶模式的锁模来产生超快矢量光场是接下来的一个重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [2] Chen J, Wan C H, Zhan Q W. Vectorial optical fields: recent advances and future prospects [J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(1): 54-74.
- [3] Pan Y, Ding J P, Wang H T. Manipulation on novel vector optical fields: introduction, advances and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126001.
潘岳, 丁剑平, 王慧田. 新型矢量光场调控: 简介、进展与应用[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126001.
- [4] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185.
- [5] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2011, 3(2):161-204.
- [6] Wang J. Advances in communications using optical vortices[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): B14-B28.
- [7] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [8] 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.
- [9] Fickler R, Campbell G, Buchler B, *et al.* Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10,010 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(48): 13642-13647.
- [10] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [11] Béché A, Juchtmans R, Verbeeck J. Efficient creation of electron vortex beams for high resolution STEM imaging [J]. *Ultramicroscopy*, 2017, 178: 12-19.
- [12] Hnatovsky C, Shvedov V G, Krolikowski W, *et al.* Materials processing with a tightly focused femtosecond laser vortex pulse [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3417-3419.
- [13] Toyoda K, Takahashi F, Takizawa S, *et al.* Transfer of light helicity to nanostructures [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(14): 143603.
- [14] Takahashi F, Miyamoto K, Hidai H, *et al.* Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21738.
- [15] Li J P, Liu J, Gao D C, *et al.* Manipulation and transmission technologies of optical field for multidimensional multiplexing optical fiber communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126008.
李建平, 刘洁, 高社成, 等. 面向光纤通信多维复用的光场调控与传输技术 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126008.
- [16] 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.
- [17] Lin D, Xia K G, Li J L, *et al.* Efficient, high-power, and radially polarized fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2290-2292.
- [18] Koyama M, Hirose T, Okida M, *et al.* Power scaling of a picosecond vortex laser based on a stressed Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 994-999.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhang W D, Huang L G, Wei K Y, *et al.* Cylindrical vector beam generation in fiber with mode selectivity and wavelength tunability over broadband by acoustic flexural wave[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10376-10384.
- [22] Zhang W D, Li X, Bai J H, *et al.* Generation and application of fiber-based structured light field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126003.
张文定, 李鑫, 白家浩, 等. 光纤结构光场产生及应用 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126003.
- [23] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, *et al.* Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1994, 112(5/6): 321-327.
- [24] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V.

- Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 534-536.
- [25] Jiang Y C, Ren G B, Lian Y D, *et al.* Tunable orbital angular momentum generation in optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3535-3538.
- [26] Li S H, Mo Q, Hu X, *et al.* Controllable all-fiber orbital angular momentum mode converter [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4376-4379.
- [27] Allen L, Padgett M J, Babiker M. IV The orbital angular momentum of light [M] // Allen L, Padgett M J, Babiker M. eds. *Progress in optics*. Amsterdam: Elsevier, 1999: 291-372.
- [28] Ismael 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.
- [29] 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.
- [30] Xiao Y L, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Design and experimental study of mode selective all-fiber fused mode coupler based on few mode fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(20): 204207.
肖亚玲, 刘艳格, 王志, 等. 基于少模光纤的全光纤熔融模式选择耦合器的设计及实验研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(20): 204207.
- [31] Wang F, Shi F, Wang T, *et al.* Method of generating femtosecond cylindrical vector beams using broadband mode converter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(9): 747-750.
- [32] Wang T, Wang F, Shi F, *et al.* Femtosecond mode-locked fiber laser with cylindrical vector beams using mode selective coupler [C] // *Asia Communications and Photonics Conference*, Nov. 2-5, 2016, Wuhan, China. Washington D C: Optical Society of America, 2016: ATh3A. 3.
- [33] Pidishety S, Srinivasan B, Brambilla G. All-fiber fused coupler for stable generation of radially and azimuthally polarized beams [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(1): 31-34.
- [34] Park K J, Song K Y, Kim Y K, *et al.* Broadband mode division multiplexer using all-fiber mode selective couplers [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3543-3549.
- [35] Wang T, Wang F, Shi F, *et al.* All-fiber mode-locked vortex laser with a broadband mode coupler [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, Mar. 19-23, 2017, Los Angeles, California, USA. Washington D C: Optical Society of America, 2017: Tu3J. 2.
- [36] 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.
- [37] Birks T A, Russell P S J, Culverhouse D O. The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(11): 2519-2529.
- [38] Lim S D, Park H C, Hwang I K, *et al.* Combined effects of optical and acoustic birefringence on acousto-optic mode coupling in photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2008, 16(9): 6125-6133.
- [39] Huang L G, Zhang W D, Li Y J, *et al.* Acousto-optic tunable bandpass filter based on acoustic-flexural-wave-induced fiber birefringence [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5431-5434.
- [40] Wei K Y, Zhang W D, Huang L G, *et al.* Generation of cylindrical vector beams and optical vortex by two acoustically induced fiber gratings with orthogonal vibration directions [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2733-2741.
- [41] Lu J F, Meng L H, Shi F, *et al.* Dynamic mode-switchable optical vortex beams using acousto-optic mode converter [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5841-5844.
- [42] Zhang X C, Zhang W D, Li C Y, *et al.* All-fiber cylindrical vector beams laser based on an acoustically-induced fiber grating [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(7): 075608.
- [43] Zhang W D, Huang L G, Wei K Y, *et al.* High-order optical vortex generation in a few-mode fiber via cascaded acoustically driven vector mode conversion [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5082-5085.
- [44] Mao D, Feng T X, Zhang W D, *et al.* Ultrafast all-fiber based cylindrical-vector beam laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(2): 021107.
- [45] Mao D, He Z W, Lu H, *et al.* All-fiber radially/azimuthally polarized lasers based on mode coupling of tapered fibers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1590-1593.
- [46] Sun B, Wang A T, Gu C, *et al.* Mode-locked all-fiber laser producing radially polarized rectangular pulses [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1691-1694.
- [47] Chen R S, Sun F L, Yao J N, *et al.* Mode-locked all-fiber laser generating optical vortex pulses with tunable repetition rate [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(26): 261103.
- [48] Zhou Y, Lin J, Zhang X Q, *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.
- [49] Wan H D, Wang J, Zhang Z X, *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.
- [50] Cai Y, Wang J, Zhang J J, *et al.* Generation of cylindrical vector beams in a mode-locked fiber laser using a mode-selective coupler[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(1): 010602.
- [51] Huang P, Cai Y, Wang J, *et al.* Multiwavelength mode-locked cylindrical vector beam fiber laser based on mode selective coupler[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(10): 105103.
- [52] 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.
- [53] Guo Y C, Liu Y G, Wang Z, *et al.* All-fiber mode-locked cylindrical vector beam laser using broadband long period grating[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(8): 085108.
- [54] Lin D, Baktash N, Berendt M, *et al.* Radially and azimuthally polarized nanosecond Yb-doped fiber MOPA system incorporating temporal shaping[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1740-1743.
- [55] Huang K, Zeng J, Gan J W, *et al.* Controlled generation of ultrafast vector vortex beams from a mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3933-3936.
- [56] Wang J, Wan H D, Cao H, *et al.* A 1- μm Cylindrical vector beam fiber ring laser based on a mode selective coupler [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(9): 765-768.
- [57] Wan H D, Wang J, Shen Z P, *et al.* All fiber actively Q-switched Yb-doped laser with radially/azimuthally polarized beam generation [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(9): 095102.
- [58] Wan H D, Wang J, Zhang Z X, *et al.* Passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser with cylindrical vector beam generation based on mode selective coupler [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3403-3407.
- [59] Lu J, Meng L, Shi F, *et al.* A mode locked fiber laser with switchable high-order modes using intracavity acousto-optic mode converter[C]//Optical Fiber Communication Conference, Mar. 3-7, 2019, San Diego, California USA. Washington D C: Optical Society of America, 2019: W3C. 3.
- [60] Shi F, Cheng P K, Huang Y P, *et al.* Mode-locked all-fiber laser emitting two-color high-order transverse mode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(7): 497-500.
- [61] Shen Y, Ren G B, Yang Y G, *et al.* Generation of the tunable second-order optical vortex beams in narrow linewidth fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(19): 1659-1662.
- [62] Yang A, Wang T, Zheng J Q, *et al.* A single-longitudinal-mode narrow-linewidth dual-wavelength fiber laser using a microfiber knot resonator [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(2): 025104.
- [63] Zheng J Q, Yang A, Wang T, *et al.* Wavelength-switchable vortex beams based on a polarization-dependent microknot resonator [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(5): 396-402.
- [64] Zhao Y H, Wang T X, Mou C B, *et al.* All-fiber vortex laser generated with few-mode long-period gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(8): 752-755.
- [65] 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 Physics Letters*, 2018, 15(11): 115101.
- [66] Zhou N, Liu J, Wang J. Reconfigurable and tunable twisted light laser[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 11394.
- [67] Chen R S, Wang J H, Zhang X Q, *et al.* High efficiency all-fiber cylindrical vector beam laser using a long-period fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 755-758.
- [68] 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.
- [69] Yao S Z, Yang Y G, Shen Y, *et al.* All-fiber single-longitudinal-mode narrow linewidth fiber ring laser with cylindrical vector beam output [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(11): 115107.
- [70] Zhou Y, Yan K, Chen R S, *et al.* Resonance efficiency enhancement for cylindrical vector fiber laser with optically induced long period grating[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(16): 161104.
- [71] Fu C L, Liu S, Bai Z Y, *et al.* Orbital angular momentum mode converter based on helical long period fiber grating inscribed by hydrogen-oxygen flame[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(9): 1683-1688.
- [72] Fu C L, Liu S, Wang Y, *et al.* High-order orbital angular momentum mode generator based on twisted photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1786-1789.

- [73] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers[J]. *Science*, 2017, 358(6359): 94-97.
- [74] Wang T, Yang A, Shi F, *et al.* High-order mode lasing in all-FMF laser cavities [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(1): 42-49.
- [75] Han S M, Yang K, Wang Z H, *et al.* Multimode oscillation Q-switched erbium-doped fiber laser with a few-mode fiber cavity[J]. *Optoelectronics Letters*, 2018, 14(6): 417-420.
- [76] Wang T, Shi F, Huang Y P, *et al.* High-order mode direct oscillation of few-mode fiber laser for high-quality cylindrical vector beams[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11850-11858.
- [77] Qin H Q, Xiao X S, Wang P, *et al.* Observation of soliton molecules in a spatiotemporal mode-locked multimode fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1982-1985.
- [78] Heng X B, Gan J L, Zhang Z S, *et al.* Transverse mode switchable all-fiber Brillouin laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4172-4175.
- [79] Zhang Y M, Li H X, Dai C S, *et al.* All-fiber high-order mode laser using a metal-clad transverse mode filter[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 29679-29686.
- [80] 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.