

百兆赫兹重频的轨道角动量模式飞秒光纤激光器*

吴航 陈燎† 李帅 杜禹璠 张驰 张新亮

(华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉光电国家研究中心, 武汉 430074)

(2023年7月3日收到; 2023年9月3日收到修改稿)

轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 模式激光器在大容量通信系统、激光加工、微粒子操作、量子光学领域研究有潜在应用价值. OAM 模式飞秒光纤激光器具有结构简单、成本低、峰值功率高等优势而被重点研究. 当前 OAM 模式飞秒光纤激光器在重复频率、脉冲宽度、光谱宽度等关键参数上分别都有突破, 但性能难以兼得, 且重复频率目前在数十 MHz. 本文基于模式相位匹配原理, 制作了大带宽的模式耦合器, 结合非线性偏振旋转锁模机理, 通过优化腔内的色散, 搭建了百兆赫兹重复频率的 OAM 模式飞秒光纤激光器. 实验结果表明, 一阶 OAM 模式光纤激光器的重复频率可达 113.6 MHz, 脉冲半高全宽 98 fs, 10 dB 带宽可达 101 nm; 二阶 OAM 模式光纤激光器的重复频率可达 114.9 MHz, 脉冲半高全宽 60 fs, 10 dB 带宽可达 100 nm. 相对于已报道的方案, 本文报道的方案在重复频率、脉宽和光谱宽度等关键参数上综合性能较好, 有望更广泛地应用于 OAM 通信、粒子操控等研究领域.

关键词: 光纤锁模激光器, 轨道角动量, 模式耦合器**PACS:** 42.60.Da, 42.50.Tx, 42.81.Qb**DOI:** 10.7498/aps.73.20231085

1 引言

自 Allen 等^[1]检测到携带轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的空间结构光后, OAM 光凭借着特殊的螺旋相位 $\exp(il\varphi)$ 分布、角向均匀的环形光强分布、 lh 的轨道角动量等特性被应用到大容量通信系统、激光加工、微纳粒子操控、量子光学等领域^[2-4]. 因此, 方便快捷地产生 OAM 光束在近些年成为了研究热点.

产生 OAM 光束可以采用模式转换器, 将基模耦合到特定的 OAM 模式中. 这些模式转换器包括: 熔融石英材料制作的螺旋相位板^[5]、构成 $\pi/2$ 相位差和 π 相位差转换器的柱透镜组^[6]、各点光轴方向不一样的 Q 玻片^[7]、超材料相位板^[8]、可以加载不同螺旋相位信息的空间光调制器^[9]、机械挤压形成周期性的光纤光栅^[10]、可调谐的声栅^[11]、氢氧

焰加工而成的螺旋光栅^[12]、激光器加工而成的各高阶模式长周期光纤光栅^[13-17]、拉锥模式耦合器^[18]. 除了模式转换器, 还可以更方便地直接用激光器产生所需的模式. 研究者们对实现特殊模式的激光器做出不少贡献, 如: 利用 Cr^{4+} :YAG 晶体作为饱和吸收体, 光子晶体光栅作为偏振镜, 产生径向偏振模式光脉冲^[19-21]. 而将 OAM 模式转换器引入激光器系统中则可以实现相应的 OAM 模式激光器. 如基于超材料相位板搭建的 60 nm 带宽可调节 OAM 激光器^[22]、基于空间光调制器搭建的可重构可调节 OAM 激光器^[23]等. 然而以上基于空间型器件的激光器往往有着体积大、成本高、难与光纤系统相匹配等劣势. 光纤激光器具备结构紧凑、与光纤链路匹配的优点, 因而全光纤 OAM 激光器成为了研究热点. Zhao 等^[24]用长周期光纤光栅作为模式转换器, 以布拉格光纤光栅作为反射镜搭建了一二阶的 OAM 模式激光器. 然而, 受限于布拉格

* 国家自然科学基金 (批准号: 61505060, 61631166003, 61675081, 61735006, 61927817) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liaochenchina@hust.edu.cn

光栅窄的反射带宽, 该激光器只适合输出连续光, 相比较于连续光激光器, 锁模光纤激光器因为有着更窄的脉冲和更高的峰值功率, 可望在大容量通信系统、激光加工、微纳粒子操控等领域得到更广泛的应用^[25]. Zhang 等^[26]用机械挤压长周期光纤光栅作为模式转换器, 两偏振控制器在环形谐振腔内通过非线性偏振旋转效应实现锁模, 最终实现了脉冲宽度 398 fs 的 OAM 模式激光输出. 此系统中, 用作模式转化器的机械挤压式长周期光纤光栅功能上可以和用作分光的单模耦合器集成, 实现激光器结构的简化. 因此, Wang 等^[27]基于单模光纤-少模光纤熔融拉锥而成的模式耦合器, 搭建了脉冲宽度分别为 273 fs 和 140 fs 的一阶和二阶 OAM 模式飞秒光纤激光器. 该激光器的 3 dB 带宽分别为 56.5 nm 和 67.6 nm, 重复频率为 36 MHz. 本文期望在现有研究基础上, 改善 OAM 光纤锁模激光器的输出性能, 提高重复频率, 并进一步降低输出脉宽, 扩大输出的光谱宽度, 以便更好地应用在大容量通信系统、激光加工和微纳粒子操控等领域.

本文基于模式耦合器中模式的相位匹配原理, 用强熔融拉锥法制作了 3 dB 偏振相关损耗的少模光纤一阶模式耦合器, 用弱熔融拉锥法制作了 0.3 dB 偏振相关损耗的环芯光纤二阶模式耦合器, 然后结合光纤激光器的非线性偏振旋转锁模机理^[28], 设计优化了激光器环形谐振腔的腔内色散: 保持激光器内的净色散为接近零的负值, 减小色散引起的脉冲展宽的同时, 负色散引入的负啁啾可以与光纤中非线性引起的正啁啾相抵消, 从而形成孤子; 采用色散系数很小且为正的色散位移光纤可以精准的补偿控制腔内的色散. 通过对腔内色散的优化控制, 本文成功实现了百兆赫兹重复频率的 OAM

光纤锁模激光器输出, 输出脉冲宽度可小于百飞秒, 输出光谱宽度可超过百纳米.

2 模式耦合器设计

光纤中 OAM 模式可以看作相应阶数的线性偏振 (Linear Polarization, LP) 模式的奇偶模相位差为 $\pm\pi/2$ 的模场叠加而成, 如下:

$$E_{LP_{lm}^{\text{even}}} \pm iE_{LP_{lm}^{\text{odd}}} = E_{OAM_{\pm l, m}}, \quad (1)$$

其中 l 表示 LP 模式的角向数, 也即 OAM 模式的拓扑荷数; m 表示模式的径向数. 本文采用光纤模式耦合器来实现基模向高阶 LP 模式的耦合, 然后再由偏振控制器调节 LP 奇偶模式之间相位差为 $\pm\pi/2$ 叠加成相应的 OAM 模式, 耦合器结构如图 1 所示.

该模式耦合器是由单模光纤 (single mode fiber, SMF) 与特种光纤 (少模光纤 (few mode fiber, FMF)、环芯光纤 (ring core fiber, RCF) 在氢氧焰的加热下熔融拉锥而成, 基模 (LP_{01} 模式) 在耦合器的单模光纤端输入, 其中部分能量在耦合区域耦合进特种光纤之中转化成高阶的模式, 因此在耦合器的单模输出端依然输出基模而在特种光纤的输出端则为高阶 LP 模式. 模式的耦合满足耦合模方程^[29], 因此可以得到模式耦合的能量分布, 如 (2) 式和 (3) 式所示:

$$P_{01}(z) = 1 - F^2 \sin^2(Kz/F), \quad (2)$$

$$P_{l,m}(z) = F^2 \sin^2(Kz/F), \quad (3)$$

$$F = \left[1 + \frac{(\beta_{01} - \beta_{lm})^2}{4K^2} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

其中, P_{01} 和 P_{lm} 分别为 LP_{01} 模式和 LP_{lm} 模式的

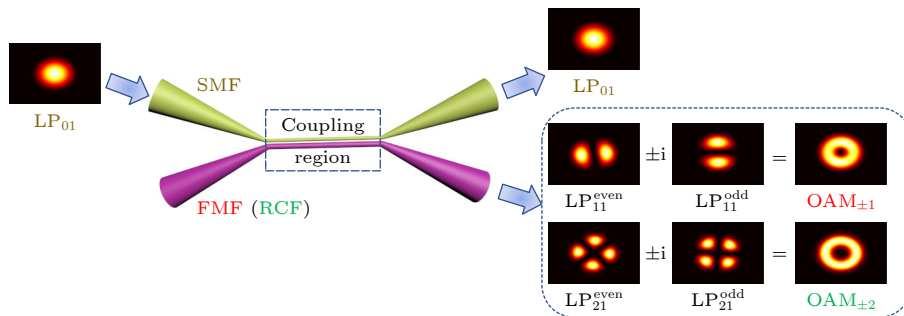


图 1 模式耦合器示意图. SMF, 单模光纤; FMF, 少模光纤; RCF, 环芯光纤

Fig. 1. Schematic diagram of the mode coupler. SMF, single mode fiber, FMF, few mode fiber; RCF, ring core fiber.

相对功率; K 为 LP_{01} 模式和 LP_{lm} 模式之间的耦合系数; z 为光在耦合区域传播的长度; β_{01} 和 β_{lm} 分别代表 LP_{01} 模式和 LP_{lm} 模式的传播常数. F^2 表示两模式之间的最大耦合效率如 (4) 式所示. 由此可知能量在单模光纤中的基模和特种光纤中的 LP_{lm} 模式之间随着耦合长度的增大而周期性交替传递, 当耦合区域长度满足 $z = \frac{(1+2m)\pi F}{2K}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) 时, 特种光纤输出端得到最大的耦合功率 F^2 , 特别地, 当耦合器满足相位匹配条件即 $\beta_{01} =$

β_{lm} 时, $F^2 = 1$, 能量完全由基模耦合到 LP_{lm} 模式上. 图 2 为用 Rsoft 对模式耦合器中模式耦合过程的仿真, 图 2(a) 和图 2(b) 分别代表单模光纤中的基模与特种光纤中的 LP_{11} 模式和 LP_{21} 模式随着耦合区域中光的传播长度 z 的变化, 能量在周期性交替传递, 与 (2) 式和 (3) 式相对应. 图 2(c)—(e) 则表示基模耦合到特种光纤中的 LP_{11} 模式模场分布随耦合长度变化半个周期 8 mm 的截面图, 图 2(f)—(h) 则表示基模耦合到特种光纤中的 LP_{21}

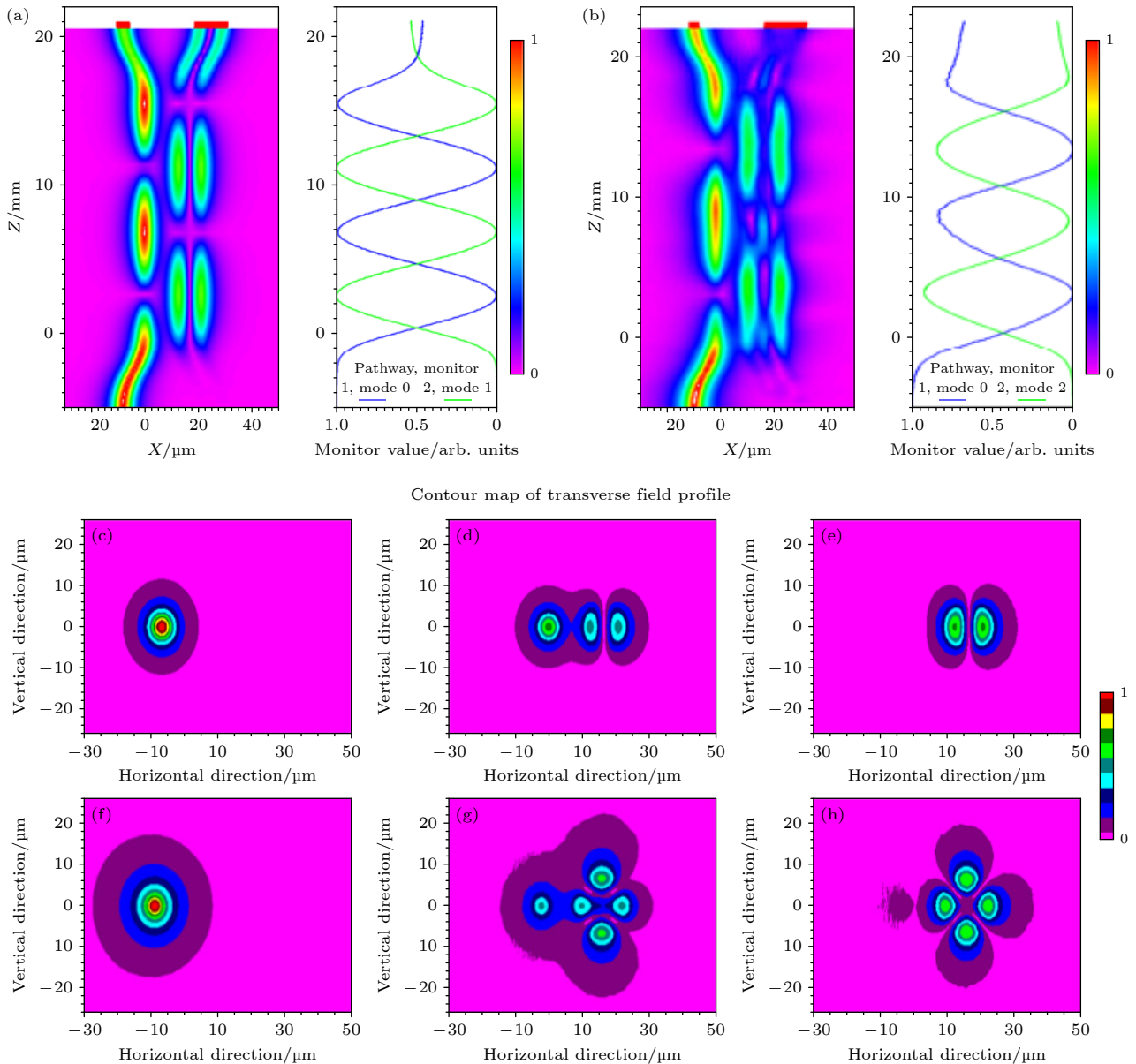


图 2 模式耦合器仿真图 (a), (b) 单模光纤中基模与特种光纤中的 LP_{11} 模式和 LP_{21} 模式之间能量分布随耦合长度 z 的变化; (c)—(e) LP_{11} 模式耦合器的模场分布图在半个耦合周期内的变化; (f)—(h) LP_{21} 模式耦合器的模场分布图在半个耦合周期内的变化

Fig. 2. Simulation diagram of mode coupler: (a), (b) Change of energy distribution with coupling length z between fundamental mode in single-mode fiber and LP_{11} mode and LP_{21} mode in special fiber; (c)—(e) change of mode field distribution of LP_{11} mode coupler during a coupling period; (f)—(h) change of the mode field distribution of the LP_{21} mode coupler during a coupling period.

模式模场分布随耦合长度变化半个周期 10 mm 的截面图. 故通过控制耦合长度可以实现耦合器分光比的调控.

耦合器除了具有分光功能, 还可以实现模式转换的功能, 基于相位匹配条件, 当单模光纤中基模与特种光纤中特定高阶模式 LP_{11} 模式或 LP_{21} 模式的有效折射率相等, 可以实现特定高阶模式的转换输出. 然而高阶模式的有效折射率低于基模的有效折射率, 且单模光纤和特种光纤的材料和结构不同也导致了模式折射率的不同, 通过熔融拉锥可以减小光纤的直径改变光场结构, 使模式的有效折射率降低, 将光纤拉锥成特定的直径可以实现模式之间的相位匹配, 从而模式耦合. 由于拉锥过程会导致光纤直径变细, 束光能力减弱, 拉锥到一定程度后, 在耦合区域中, 光纤纤芯里的光一部分会泄露到包层成为包层模, 更容易实现能量的完全转化交替.

图 3(a) 为单模光纤 (纤芯/包层直径为 $8\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$, $NA = 0.13$) 和少模光纤 (纤芯/包层直径为 $19\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$, $NA = 0.12$) 拉锥制作的耦合器中基模和 LP_{11} 模式的有效折射率随着光纤包层半径的变化. 其中单模和少模光纤包层的折射率为 1.444, 模式在有效折射率低于 1.444 时变为包层模, 光在包层中进行传播和耦合. 图 3(a) 中最终单模光纤纤芯半径为 $0.435\ \mu\text{m}$, 包层半径为 $6.8\ \mu\text{m}$, 少模光纤纤芯半径为 $1.7\ \mu\text{m}$, 包层半径为 $11.2\ \mu\text{m}$ 的时候模式的有效折射率相等, 光能从基模耦合到 LP_{11} 模式. 与此类似, 图 3(b) 为单模光纤和环芯光纤 (中心/芯层/包层直径分别为 $7\ \mu\text{m}/16.7\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$, $NA = 0.29$) 拉锥制作的耦合器中基模和 LP_{21} 模式的有效折射率随着光纤包层半径的变化.

最终得到单模纤芯半径为 $0.425\ \mu\text{m}$ 、包层半径为 $6.65\ \mu\text{m}$ 时模式的有效折射率, 与环芯光纤纤芯半径为 $1.85\ \mu\text{m}$ 、包层半径为 $13.85\ \mu\text{m}$ 时的有效折射率相等, 光能从基模耦合到 LP_{21} 模式. 由于单模光纤最终需要直径更小, 为了使光纤直径得到匹配, 故首先对单模光纤进行了预拉锥, 一二阶模式耦合器分别将单模光纤拉锥至纤芯半径 $2.43\ \mu\text{m}$ 和 $1.92\ \mu\text{m}$, 包层半径为 $37.95\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$. 然后再和特种光纤共同拉锥得到上述结果. 本文用强熔融拉锥技术控制了一阶模式耦合器, 较高的火温拉锥过程中对光纤进行了一定的破坏, 产生的非对称性折射率调制导致的偏振相关损耗为 3 dB, 该方法得到的模式耦合器耐用性和稳固性更佳. 用弱熔融拉锥技术控制了二阶模式耦合器, 拉锥过程中光纤结构较完整, 经过测量偏振相关损耗仅为 0.3 dB, 该方法得到的模式质量更高且更容易进行锁模. 本文的强熔融拉锥技术是基于分离式火头, 加入大流量的氢气和氧气的情况下, 产生 $1000\ \text{C}$ 高温的火焰, 在拉锥过程中火头来回移动反复灼烧 V 型槽里的两根光纤, 破坏光纤的结构; 弱熔融拉锥技术则是基于一体式火头加入低流量的氢气和氧气, 产生数百摄氏度的火焰, 在拉锥过程中慢慢灼烧两根平行放置光纤的结点, 使光纤紧密贴合在一起, 此方法可以较为完整地保持光纤的结构. 采用这两种拉锥技术制作的耦合器在本文合理的设计激光腔内结构下均能应用于百兆赫兹重复频率、百飞秒以内脉冲宽度的 OAM 模式飞秒光纤激光器.

通过上述的理论分析可知, 模式耦合器可以将基模耦合到高阶 LP 模式, 进而转化为相应阶数的 OAM 模式. 将模式耦合器放入环形谐振腔之中可

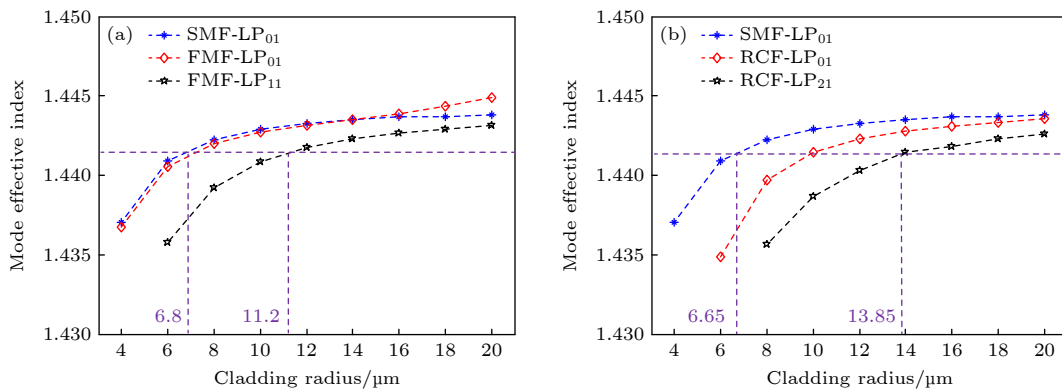


图 3 (a) LP_{11} 模式耦合器的相位匹配图; (b) LP_{21} 模式耦合器的相位匹配图

Fig. 3. (a) Phase-matching diagram of the LP_{11} mode coupler; (b) phase-matching diagram of the LP_{21} mode coupler.

以搭建相应模式的激光器. 模式耦合器分光比的波长相关性对激光器的输出光谱特性有很大的影响, 本文对制作的 LP_{11} 模式和 LP_{21} 模式耦合器分光比随波长的变化进行测量. 图 4(a) 和图 4(b) 分别为一阶和二阶模式耦合器中 LP_{11} 模式和 LP_{21} 模式与基模的相对功率比随波长的变化曲线. 图 4(a) 显示在中心波长 1550 nm 处, 分光比约为 50:50, 而图 4(b) 所示分光比约为 5:95. LP_{21} 模式耦合器的光谱相对于 LP_{11} 模式耦合器更加平坦是由于制作耦合器的工艺不同, 弱熔融拉锥的分光比随波长的变化相对较小. 基于图 4 中的分光比随波长的变化, 可以由单模端的输出光谱计算出特种光纤的输出光谱.

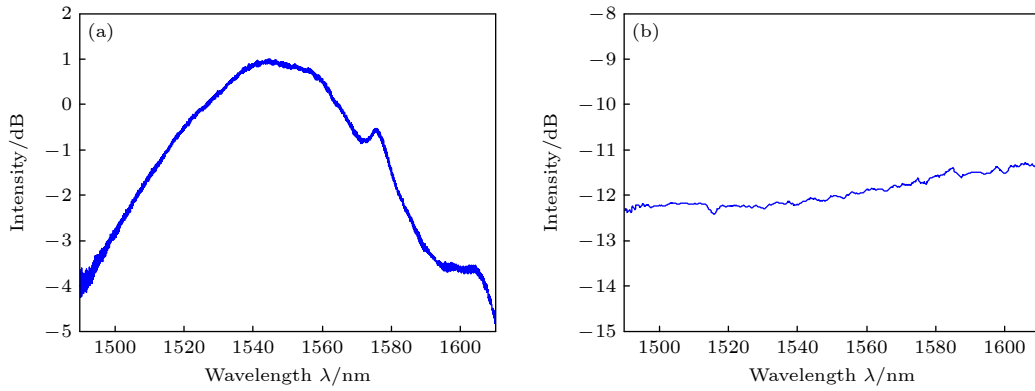


图 4 (a) LP_{11} 模式耦合器中 LP_{11} 模式与基模相对功率比随波长的变化; (b) LP_{21} 模式耦合器中 LP_{21} 模式与基模相对功率随波长的变化

Fig. 4. (a) Relative power of LP_{11} mode to fundamental mode in LP_{11} mode coupler varies with wavelength; (b) relative power of LP_{21} mode to fundamental mode in LP_{21} mode coupler varies with wavelength.

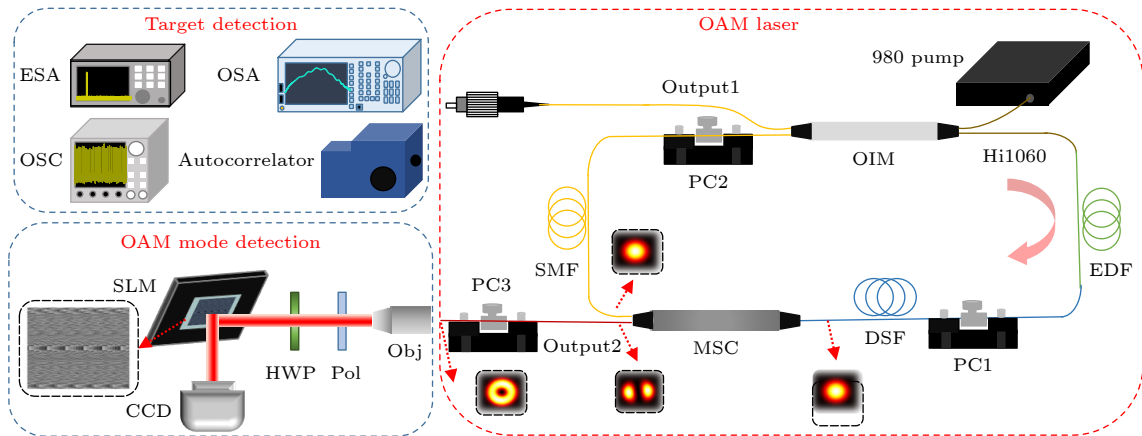


图 5 一阶 OAM 模式锁模激光器以及检测装置. OIM, 光学集成模块; EDF, 掺铒光纤; DSF, 色散位移光纤; SMF, 单模光纤; MSC, 模式选择耦合器; PC, 偏振控制器; ESA, 电谱仪; OSA, 光谱仪; OSC, 示波器; SLM, 空间光调制器; Obj, 物镜; Pol, 偏振器; HWP, 半波片; CCD, 电荷耦合元件

Fig. 5. First-order OAM mode-locked laser and detector. OIM, optical integrated module, EDF, erbium-doped fiber; DSF, dispersion-shifted fiber; SMF, single-mode fiber; MSC, mode-selective coupler; PC, polarization controller; ESA, electrical spectrum analyzer; OSA, optical spectrum analyzer; OSC, oscilloscope; SLM, spatial light modulator; Obj, objective; POL, polarizer; HWP, half-wave plate; CCD, charge-coupled device.

3 实验系统及测量结果

3.1 一阶 OAM 模式激光器参数测量

基于制作的一阶模式耦合器, 搭建的一阶 OAM 模式激光器结构图如图 5 所示. 图 5(a) 和图 5(b) 分别是测试装置图和激光器的结构图. OAM 光纤激光器包含用于提供能量的最大功率为 700 mW 的 980 nm 泵浦源、光学集成模块 (隔离器、线偏振器、980 nm/1550 nm 波分复用器、90:10 的耦合器)、Hi1060 光纤、用作增益介质的 ER80 掺铒光纤、用于精准调控腔内色散的非零色散补偿光纤、用于控制腔内偏振态的两个偏振控制器 (PC1 和 PC2)、用于分光和耦合出高阶模式且损耗

为 0.9 dB 的 50:50 模式耦合器等部分. 在谐振腔输出口 1 的耦合器分光比是 90:10, 10% 功率的光用于输出检测激光器的性能指标, 剩余 90% 功率的光依然在腔内谐振; 在输出口 2 的模式耦合器中 50% 功率的光由基模耦合到 LP_{11} 模式并且在偏振控制器 3 的作用下叠加成为一阶 OAM 模式, 剩余 50% 功率的光则在谐振腔内以基模的形式传播. 激光器谐振腔中, 由于模式耦合器是一个偏振相关器件, 有 3 dB 的偏振相关损耗, 偏振控制器 2 的一个重要作用就在于补偿模式耦合器带来的偏振相关损耗. 激光器的重复频率取决于环形腔的整体腔长. OAM 激光器的输出光谱宽度主要取决于腔内净色散、模斑转换器的工作带宽. 在上文中通过精心设计模斑耦合器的相位匹配, 耦合器的带宽实测都已经超过 150 nm. 因此, 本激光器重点在于腔内净色散的匹配. 一般而言, 腔内净色散越小, 光谱带宽越大, 但这种净色散越小要求腔内色散匹配越精细. 传统色散补偿光纤虽然能补偿单模光纤和增益光纤的色散, 但由于其色散系数远大于这两者, 实际很难精细匹配腔内净色散, 因此报道的 OAM 激光器光谱较难达到 100 nm 量级. 此外色散光纤模斑与单模光纤差异较大耦合损耗通常在 3 dB 以上. 文中选择了色散位移光纤, 其色散特性与色散补偿光纤相同, 色散系数则与单模光纤和增益光纤量级相同可以进行精细色散匹配. 此外其与单模光纤熔接损耗可忽略不计, 因此无需较长增益光纤, 从而保证 OAM 激光器腔长较短重复频率较高. 通过综合考虑色散和腔长等因素, 选择的谐振腔光纤包含: 群速度色散参量 $-19.1 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的掺铒光纤 27 cm; 群速度色散参量 $-5.74 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的 Hi1060 光纤 18 cm; 群速度色散参量 $-21.7 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的单模光纤 64 cm; 群速度色散参量 $7.65 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的色散位移光纤 71 cm. 激光谐振腔的净色散为 -0.0146 ps^2 , 总腔长为 1.8 m. 重复频率 $f = C/nL$, L 取 1.8 m, 标准单模光纤的折射率取 1.46, 则可以估算出 $f = 114.2 \text{ MHz}$.

图 5(a) 上区域为监测激光器指标的仪器, 包含光谱仪、电谱仪、示波器、自相关仪; 下区域为检测 OAM 模式的实验装置, 原理类似于柱透镜压缩光场^[30], 激光器 2 号输出端的 LP 模式的光经过偏振控制器的调节后可以实现模式的叠加形成相应的 OAM 模式. 光束经过 $40\times$ 物镜的准直成平行光进入加载有相位信息的空间光调制器后被衍射到

CCD 中, 通过观察 CCD 中的模场分布可以检验出 OAM 模式是否产生. 由于空间光调制器上的信息只对于特定方向的偏振光起作用, 因此, 在空间光调制器前方加入了线偏振器和半玻片控制入射光的偏振态.

光纤锁模激光器的输出特性如图 6 所示, 图 6(a) 是光谱仪测量的激光器输出带宽, 10 dB 带宽有 101.4 nm. 图 6(b) 是用电谱仪测量的频谱图, 可以观测到信噪比为 70 dB, 且重复频率为 113.6 MHz. 图 6(c) 是用示波器检测的脉冲序列示意图, 相邻脉冲之间相隔 8.8 ns, 对应于 6(b) 中的重复频率. 图 6(d) 表示用自相关仪检测后经过洛伦兹线型拟合的脉冲半高全宽是 98 fs. 这些测量的参数指标证明了搭建的一阶 OAM 模式光纤激光器重复频率超过 100 MHz, 输出脉冲光谱宽度超过 100 nm, 脉冲宽度小于 100 fs.

3.2 二阶 OAM 模式激光器参数测量

类似于二阶 OAM 模式激光器, 基于弱熔融拉锥技术制作的 LP_{21} 模式耦合器搭建的二阶 OAM 模式激光器结构如图 7 所示, 整体结构和一阶 OAM 模式激光器相似, 但是由于该 LP_{21} 模式耦合器的偏振相关损耗仅仅 0.3 dB, 可以看作偏振无关器件, 因此腔内除了集成偏振控制器件之外没有另外的偏振控制器, 更易于锁模. 模式耦合器中单模输出的基模和环芯光纤输出的 LP_{21} 模式分光比为 95:5, 耦合器的损耗为 5.5 dB. 为了弥补耦合器本身损耗带来的腔内功率值低, 980 nm 泵浦源改成最大输出功率为 1 W. 同样地, 综合考虑色散和腔长等因素, 谐振腔中光纤包含掺铒光纤 27 cm, Hi1060 光纤 13 cm, 单模光纤 53 cm, 色散位移光纤 85 cm. 其中各种类型光纤群速度参数与一阶激光器相同, 谐振腔的净色散为 -0.0109 ps^2 , 总腔长为 1.78 m, 可以估算出重复频率为 115.4 MHz.

图 8 可以观察到测量的二阶 OAM 模式激光器的输出性能指标, 图 8(a) 是光谱仪测量的激光器输出光谱图, 可测量得到 10 dB 带宽达 100 nm. 但是光谱整体图和一阶模式激光器的光谱相比较形状发生改变, 这是由耦合器本身的结构不同以及腔内各光纤长度不同导致的非线性不一样引起的变化. 图 8(b) 是用电谱仪测量的频谱图, 可以观测到信噪比为 60 dB, 且重复频率为 114.9 MHz.

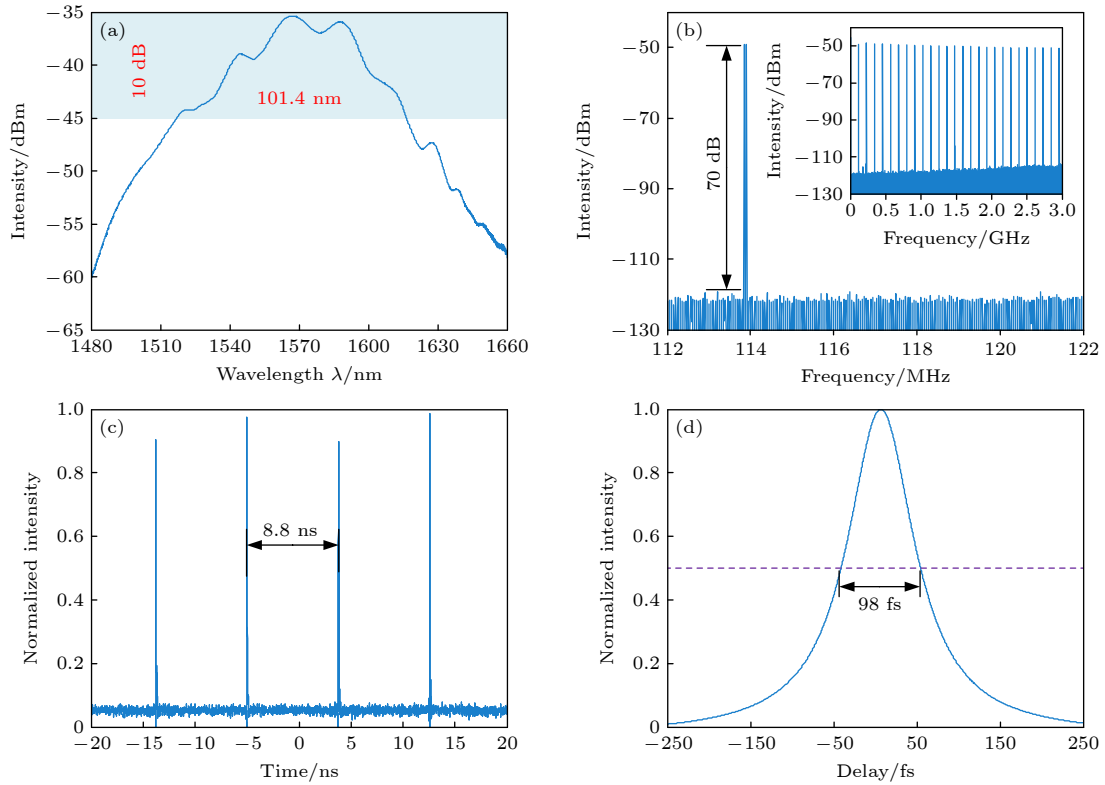


图 6 一阶 OAM 模式锁模激光器的指标检测 (a) 激光器输出光谱; (b) 电谱仪测量下的频率成分; (c) 激光器输出锁模脉冲序列; (d) 自相关仪测量的洛伦兹拟合脉冲

Fig. 6. Target detection of the first-order OAM mode-locked laser: (a) Output optical spectrum of laser; (b) frequency component measured by electrical spectrum analyzer; (c) output mode-locked pulse sequence of laser; (d) Lorentz mode-locked pulse measured by autocorrelator.

图 8(c) 是用示波器检测的脉冲序列示意图, 相邻脉冲之间相隔 8.7 ns, 对应于图 8(b) 中的重复频率. 图 8(d) 则表示用自相关仪检测后经过洛伦兹线型拟合的脉冲半高全宽是 60 fs. 这些参数证明了本文搭建的二阶 OAM 光纤锁模激光器重复频率达到了 114.9 MHz, 输出脉冲宽度达到 60 fs.

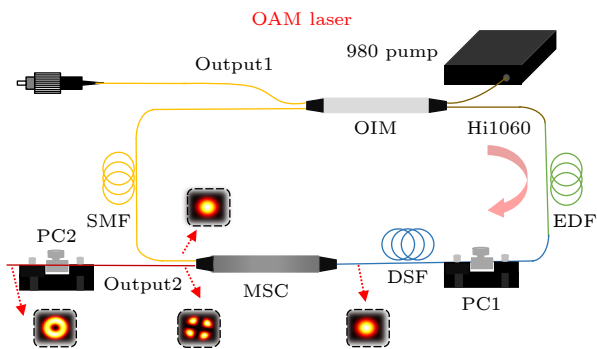


图 7 二阶 OAM 模式锁模激光器. OIM, 光学集成模块; EDF, 掺铒光纤; DSF, 色散位移光纤; SMF, 单模光纤; MSC, 模式选择耦合器; PC, 偏振控制器

Fig. 7. Second-order OAM mode-locked laser and detector. OIM, optical integrated module; EDF, erbium-doped fiber; DSF, dispersion-shifted fiber; SMF, single-mode fiber; MSC, mode-selective coupler; PC, polarization controller.

图 9 给出了测量的激光器输出功率与泵浦功率之间的关系. 图 9(a) 为一阶 OAM 模式激光器输入输出功率关系曲线, 其中蓝线和红线代表从谐振腔端口 1 输出的单模光纤基模功率, 黑线和绿线代表谐振腔输出端口 2 输出的少模光纤 OAM 的功率. 当泵浦功率低于 295 mW 时, 激光器里各纵模之间相位差随机, 处于非锁模状态, 输出杂散连续光, 激光器输出功率随泵浦功率的增大而线性增大. 当泵浦功率高于 295 mW 时, 在非线性偏振旋转的作用下实现了锁模, 此时会输出超短脉冲光, 输出功率会有明显的跳变. 图 9(b) 为二阶 OAM 模式激光器的功率曲线, 其中的锁模阈值为 555 mW, 相比于一阶 OAM 模式激光器的阈值更大, 其原因在于其采用的 LP_{21} 模式耦合器插入损耗为 5.5 dB, 而一阶 OAM 模式激光器中 LP_{11} 模式耦合器只有 0.9 dB 的插入损耗. 为了防止二阶模式耦合器本身损耗影响腔内锁模, 故耦合器在制作时候采用的单模输出端与 LP_{21} 模式输出比为 95:5, 以保证腔内稳定的锁模. 同时由于耦合器分光比的不同, 一二阶 OAM 模式激光器最终输出端

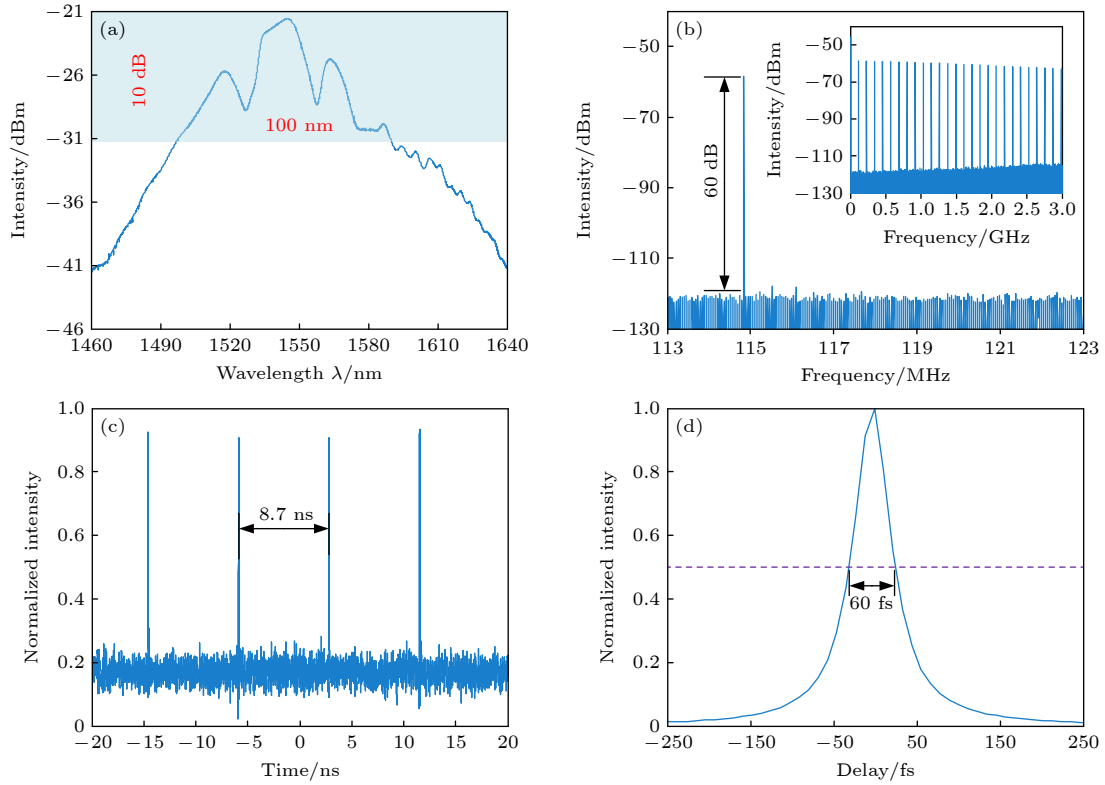


图 8 二阶 OAM 模式锁模激光器的指标检测 (a) 激光器输出光谱; (b) 电谱仪测量下的频率成分; (c) 激光器输出锁模脉冲序列; (d) 自相关仪检测的洛伦兹拟合脉冲

Fig. 8. Target detection of the second-order OAM mode-locked laser: (a) Output optical spectrum of laser; (b) frequency component measured by electrical spectrum analyzer; (c) output mode-locked pulse sequence of laser; (d) Lorentz fitting pulse measured by autocorrelator.

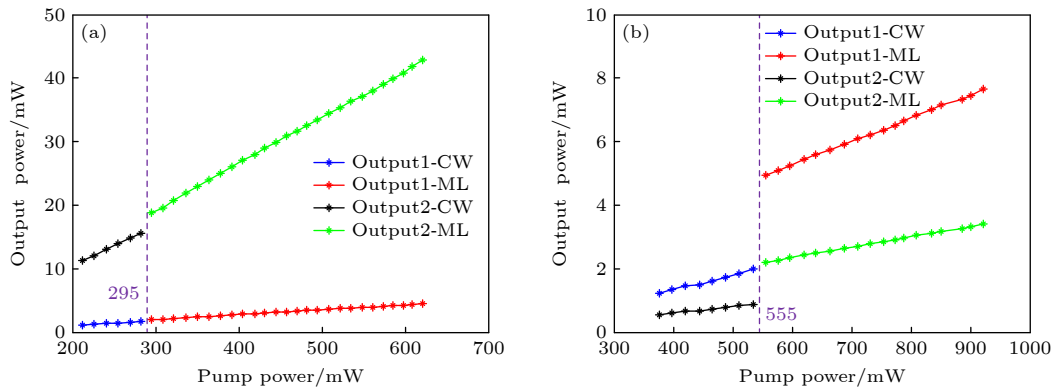


图 9 (a) 一阶 OAM 模式激光器输出功率与泵浦功率之间的函数关系; (b) 二阶 OAM 模式激光器输出功率与泵浦功率之间的函数关系

Fig. 9. (a) Functional relationship between the output power of the first-order OAM-mode laser and the pump power; (b) functional relationship between the output power of the second-order OAM-mode laser and the pump power.

激光的功率也不同, 一阶 OAM 模式激光器的少模端 OAM 模式输出功率高, 二阶 OAM 模式激光器的单模端基模输出功率相对要高.

在上述两种激光器的测试实验过程中, 两种激光器都可以实现开机自启动, 并且测量前后的输出功率、光谱带宽、脉冲宽度基本一致, 其中一阶

OAM 激光器在短期内稳定性较好. 由于一阶耦合器偏振相关损耗较大, 容易因外界湿度、温度、振动等影响导致偏振相关损耗变化引起激光器不能自启动, 此时只需要重新调节偏振控制器补偿偏振相关损耗变化, 锁模后激光器将再次处于稳定状态. 相比较而言, 基于弱熔融拉锥法制作的二

阶 OAM 激光器由于耦合器的偏振相关损耗可忽略不计, 激光器的偏振相关性主要由偏振控制器决定, 因此激光器可以在一个月内长期维持自启动的状态.

4 讨论与分析

通过上述的实验结果可知, 无论是用少模光纤还是环芯光纤, 无论是偏振相关或是偏振无关的耦合器, 无论是一阶模式耦合器还是二阶模式耦合器, 都能够通过适当的腔内结构设计, 实现百兆赫兹重复频率、百飞秒内脉冲宽度、百纳米输出光谱宽度的锁模光纤激光器. 由于色散会导致脉冲展宽, 因此需要对腔内色散进行补偿, 本文腔内采用色散位移光纤的色散系数较之文献 [27] 中的正色散补偿光纤小了很多, 更方便地进行光纤长短的变化来改变腔内的色散, 又因为负色散引入的负啁啾可以与光纤中一定程度的自相位调制引入的正啁啾抵消形成孤子, 因此使其维持很小的负色散量可以更好实现大带宽与窄脉冲的要求.

以上实验结果证明了激光器的性能指标得到了提升, 但还需要进一步地验证激光器中特种光纤端输出的是特定的 OAM 模式. 因此采用图 5 左下角装置进行验证. 当不调节偏振控制器且空间光调制器上不加载信息时, CCD 上可以观测到的模场

如图 10(a)—(d) 所示, 两瓣的亮斑代表 LP_{11} 模式偶模和奇模, 四瓣的亮斑代表 LP_{21} 模式的偶模和奇模. 在合适地调节偏振控制器后, LP 模式的奇偶模式之间形成 $\pm\pi/2$ 的相位差且模式比例为 1:1 时会叠加形成图 10(e)—(h) 所示的圆环形光场, 为了验证图 10(e) 和图 10(f) 是否为 $OAM_{\pm 1}$ 模式, 图 10(g) 和图 10(h) 是否为 $OAM_{\pm 2}$ 模式, 在空间光调制器上加载了一个等效于柱透镜的相位, 待检测的环形光场经过空间光调制器的调制后衍射进入 CCD, 得到的光场如图 10(i)—(l) 所示, 图 10(i) 和图 10(j) 两个不同方向的两条明条纹代表着 $OAM_{\pm 1}$ 模式, 图 10(k) 和图 10(l) 两个不同方向的三条明条纹代表着 $OAM_{\pm 2}$ 模式. 因此, 经过实验的验证, 一阶 OAM 模式激光器与二阶 OAM 模式激光器都成功地产生了相应的 OAM 模式.

将当前文献报道其他激光器性能和指标与本文激光器进行了比较, 如表 1 所列, 按不同的模式转换器分类如下: 错位熔接光纤 (OSS)^[31]、熔融拉锥耦合器 (FBT)^[27,32]、长周期光纤光栅 (LPFG)^[33,34]、布拉格光栅 (FBG)^[35]、声致光栅 (AIFG)^[36,37], 以及空间器件 (Space)^[38]. 通过以上的对比可知, 本文 OAM 模式激光器的性能指标在全光纤型激光器中有着更高重复频率, 更大光谱带宽, 更窄脉冲宽度等优势, 是首个同时实现百兆赫兹重复频率、

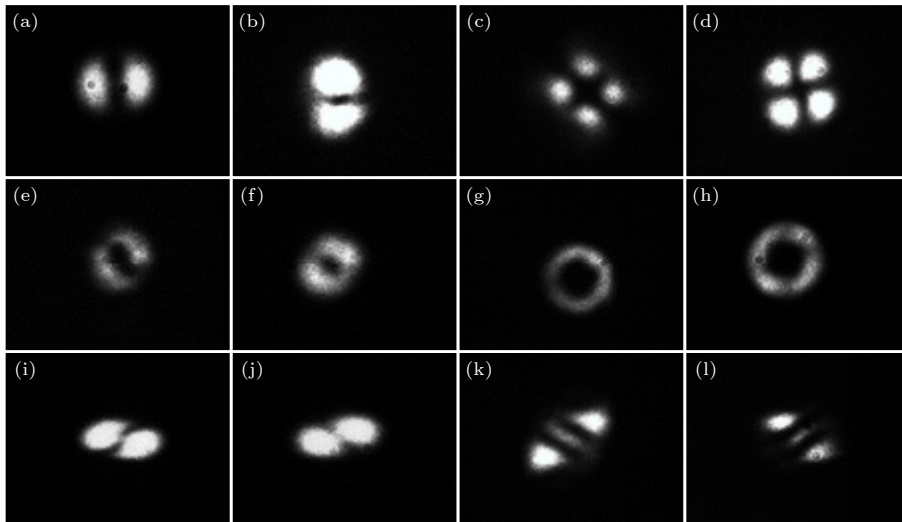


图 10 一阶和二阶模式激光器输出模场 (a) LP_{11}^{even} 模式; (b) LP_{11}^{odd} 模式; (c) LP_{21}^{even} 模式; (d) LP_{21}^{odd} 模式; (e) OAM_{+1} 模式; (f) OAM_{+1} 模式; (g) OAM_{-2} 模式; (h) OAM_{+2} 模式; (i)—(l) 分别代表着图 (e)—(h) 经过空间光调制器上加载的柱透镜相位调制后衍射的模场
Fig. 10. Output mode fields of first-order mode and second-order mode laser: (a) LP_{11}^{even} mode; (b) LP_{11}^{odd} mode; (c) LP_{21}^{even} mode; (d) LP_{21}^{odd} mode; (e) OAM_{+1} mode; (f) OAM_{+1} mode; (g) OAM_{-2} mode; (h) OAM_{+2} mode; (i)—(l) represent the mode fields of panels (e)—(h) diffracted by the spatial light modulator loading phase of the cylindrical lens.

表 1 当前其他激光器性能和指标与本文激光器的比较
Table 1. Performance and index of other lasers are compared with the laser in this paper.

参考文献/ 模式耦合器	工作机制	重复频率	中心波长/nm	输出光谱 宽度/nm	输出脉宽	输出功率	模式
[31]/OSS	锁模	13.6 MHz	1550.5	0.34	6.87 ps	—	TE ₀₁ , TM ₀₁
[27]/FBT	锁模	36.1 MHz	1547.4	56.5	273 fs	5.6 mW	OAM _{±1}
			1545.0	67.6	140 fs		OAM _{±2}
[32]/FBT	锁模	26 MHz	1045.0	14	—	75 mW	LP ₁₁
				15.5	—	65 mW	LP ₂₁
				18	—	16 mW	LP ₀₂
[33]/LPFG	锁模	9.83 MHz	1030.0	5	168 ps	15 mW	CVB
[34]/LPFG	QSW	30.7 kHz	1548.2	0.4	5.2 μs	1.3 μW	OAM _{±3}
[35]/FBG	锁模	10.16 MHz	1549.4	0.08	52.87 ps	17.16 mW	OAM ₀ , OAM _{±1}
[36]/AIFG	锁模	4.835 MHz	1532.9	<0.1	400 ps	30 mW	OAM _{±1}
[37]/AIFG	锁模	25 MHz	1560.0	10	384 fs	—	OAM _{±1}
[38]/Space	锁模	33 MHz	1030.0	18	87 fs	108 mW	OAM _{±1}
本文/FBT	锁模	114 MHz	1550.0	101	98 fs	40 mW	OAM _{±1}
				100			OAM _{±1}
				100			OAM _{±2}
		115 MHz		100	60 fs	4 mW	OAM _{±2}

百飞秒以内脉冲宽度和百纳米输出光谱宽度的 OAM 模式光纤激光器. 该激光器性能指标的的实现得益于选用了能够精准调节腔内色散的色散位移光纤, 相比较于传统的色散补偿光纤色散系数小了一个数量级, 因此能够更好地调节腔内色散, 实现大光谱带宽、窄脉冲宽度的指标. 另外, 该光纤的直径为 8 μm 与单模光纤相同, 相比于 DCF 高达 3 dB 的熔接损耗可以忽略不计, 因此只需较短增益的 EDF, 从而保证了整体腔长较短, 实现高重复频率. 此外, 本文分析对比了强熔融拉锥和弱熔融拉锥耦合器对激光器锁模的影响, 完整地表述了耦合器有无偏振相关性都能实现高指标性能的激光器. 该激光器还能与 OAM 放大器^[39] 配合使用, 应用于光通信、激光加工等领域.

5 结 论

本文通过强熔融拉锥法制作了损耗 0.9 dB 且 PDL3 dB 的单模光纤-少模光纤的 LP₁₁ 模式耦合器. 通过弱熔融拉锥法制作了损耗 5.5 dB 且 PDL0.3 dB 的单模光纤-环芯的 LP₂₁ 模式耦合器. 通过设计和优化激光谐振腔内结构, 基于以上两种耦合器搭建了百纳米带宽、百兆赫兹重复频率、百飞秒脉冲半高全宽的 OAM 模式光纤激光器, 其中一阶 OAM 模式激光器 10 dB 带宽 101.4 nm,

重复频率 113.6 MHz, 脉冲半高全宽 98 fs; 二阶 OAM 模式激光器 10 dB 带宽 100 nm, 重复频率 114.9 MHz, 脉冲半高全宽 60 fs. 与其他 OAM 模式光纤激光器相比, 提高了光谱宽度、重复频率, 压窄了脉冲宽度, 为进一步实现大带宽高重频窄脉冲的 OAM 激光器开拓了道路, 可广泛应用于手性纳米结构以及 OAM 光频梳等领域^[40].

参考文献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [2] Wen Y, Chremmos I, Chen Y, Zhu G, Zhang J, Zhu J, Zhang Y, Liu J, Yu S 2020 *Optica* **7** 254
- [3] Leach J, Jack B, Romero J, Jha A K, Yao A M, Frank-Arnold S, Ireland D G, Boyd R W, Barnett S M, Padgett M J 2010 *Science* **329** 662
- [4] Grier D 2003 *Nature* **424** 810
- [5] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, Woerdman J P 1994 *Opt. Commun.* **112** 321
- [6] Poynting J H 1909 *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **82** 560
- [7] Marrucci L, Karimi E, Slussarenko S, Piccirillo B, Santamato E, Nagali E, Sciarrino, F 2011 *J. Opt.* **13** 064001
- [8] Zhao Z, Wang J, Li S, Willner A E 2013 *Opt. Lett.* **38** 932
- [9] Chen Y, Fang Z X, Ren Y X, Gong L, Lu R D 2015 *Appl. Opt.* **54** 8030
- [10] Li S, Mo Q, Hu X, Du C, Wang J 2015 *Opt. Lett.* **40** 4376
- [11] Zhang W, Wei K, Huang L, Mao D, Jiang B, Gao F, Zhao J 2016 *Opt. Express* **24** 19278
- [12] Shao L, Liu S, Zhou M, Huang Z, Bao W, Bai Z, Wang Y 2021 *Opt. Express* **29** 43371
- [13] Li Y J, Jin L, Wu H, Gao S C, Feng Y H, Li Z H 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 7200909

- [14] Han Y, Liu Y G, Wang Z, Huang W, Chen L, Zhang H W, Yang K 2018 *Nanophotonics* **7** 287
- [15] Wu H, Gao S, Huang B, Feng Y, Huang X, Liu W, Li Z 2017 *Opt. Lett.* **42** 5210
- [16] Detani T, Zhao H, Wang P, Suzuki T, Li H 2021 *Opt. Lett.* **46** 949
- [17] He X, Tu J, Wu X, Gao S, Shen L, Hao C, Li Z 2020 *Opt. Lett.* **45** 3621
- [18] Pidishety S, Khudus M I M A, Gregg P, Ramachandran S, Srinivasan B, Brambilla G 2016 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) San Jose, CA, June 5–10, 2016* pSTu1F.2
- [19] Li J, Ueda K, Musha M, Zhong L, Shirakawa A 2008 *Opt. Lett.* **33** 2686
- [20] Lin D, Xia K, Li J, Li R, Ueda K, Li G, Li X 2010 *Opt. Lett.* **35** 2290
- [21] Lin D, Xia K, Li R, Li X, Li G, Ueda K, Li J 2010 *Opt. Lett.* **35** 3574
- [22] Gui L, Wang C, Ding F, Chen H, Xiao X, Bozhevolnyi S, Zhang X, Xu K 2023 *ACS Photonics* **10** 623
- [23] Zhou N, Liu J, Wang J 2018 *Sci. Rep.* **8** 11394
- [24] Zhao Y, Wang T, Mao C, Yan Z, Liu Y, Wang T 2018 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **30** 752
- [25] Toyoda K, Miyamoto K, Aoki N, Morita R, Omatsu T 2012 *Nano Lett.* **12** 3645
- [26] Zhang Z, Wei W, Tang L, Yang J, Guo J, Ding L, Li Y 2018 *Chin. Opt. Lett.* **16** 110501
- [27] Wang T, Wang F, Shi F, Pang F, Huang S, Wang T, Zeng X 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 2161
- [28] Deng D, Zhan L, Gu Z, Gu Y, Xia Y 2009 *Opt. Express* **17** 4284
- [29] Park K, Song K, Kim Y, Lee J, Kim B 2016 *Opt. Express* **24** 3543
- [30] Zhou H, Dong J, Wang J, Li S, Cai X, Yu S, Zhang X 2017 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **29** 86
- [31] Mao D, Feng T, Zhang W, Lu H, Jiang Y, Li P, Jiang B, Sun Z, Zhao J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 021107
- [32] Huang Y, Shi F, Wang T, Liu X, Zeng X, Pang F, Wang T, Zhou P 2018 *Opt. Express* **26** 19171
- [33] Tao R, Li H, Zhang Y, Yao P, Xu L, Gu C, Zhan Q 2020 *Opt. Laser Technol.* **123** 105945
- [34] Xiao R, Tu J, Li Wei, Gao S, Wen T, Du C, Zhou J, Zhang B, Liu W, Li Z 2022 *Opt. Express* **30** 12605
- [35] Jiang X, Yao J, Zhang S, Wang A, Zhan Q 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 131101
- [36] Zhang W, Wei K, Mao D, Wang H, Gao F, Huang L, Mei T, Zhao J 2017 *Opt. Lett.* **42** 454
- [37] Lu J, Shi F, Meng L, Zhang L, Teng L, Luo Z, Yan P, Pang F, Zeng X 2020 *Photonics Res.* **8** 1203
- [38] Hu H, Chen Z, Cao Q, Zhan Q 2023 *IEEE Photonics J.* **15** 1
- [39] Xue X, Jiang Q, Pang F, Wen J, Chen W, Zeng X, Zhang L, Wei H, Wang T 2023 *Opt. Express* **31** 24623
- [40] Fu S, Zhai Y, Zhang J, Liu X, Song R, Zhou H, Gao C 2022 *Adv. Photonics Nexus* **1** 016003

Orbital angular momentum mode femtosecond fiber laser with over 100 MHz repetition rate*

Wu Hang Chen Liao[†] Li Shuai Du Yu-Fan
Zhang Chi Zhang Xin-Liang

(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)
(Received 3 July 2023; revised manuscript received 3 September 2023)

Abstract

Orbital angular momentum (OAM) lasers have potential applications in large capacity communication systems, laser processing, particle manipulation and quantum optics. OAM mode femtosecond fiber laser has become the research focus due to the advantages of simple structure, low cost and high peak power. At present, OAM mode femtosecond fiber lasers have made some breakthroughs in key parameters such as repetition frequency, pulse width, spectrum width, but it is difficult to achieve good overall performance. Besides, the repetition rate is tens of MHz at present. In this paper, a large-bandwidth mode coupler is made based on the mode phase matching principle. In coupler, the first order mode coupler with 3 dB polarization dependent loss is made by the technology of strong fused biconical taper, and the second order mode coupler with 0.3 dB polarization dependent loss is made by the technology of weak fused biconical taper. By combining the nonlinear polarization rotation mode-locking mechanism, OAM mode femtosecond fiber laser with over 100 MHz repetition rate is built. The achievement of the key parameters is attributed to the selection of dispersion shifted fibers that can accurately adjust intracavity dispersion. Comparing with traditional dispersion compensation fibers (DCF), the group velocity dispersion is reduced by an order of magnitude, so it can better adjust intracavity dispersion to achieve the indexes of large spectral bandwidth and narrow pulse width. In addition, the diameter of the fiber is 8 μm , which is the same as that of a single mode fiber. Comparing with DCF, the fusion loss can be ignored, so only a shorter gain Erbium-doped fiber is required, which ensures a shorter overall cavity length and achieves high repetition frequency. The experimental results show that the first order OAM mode fiber laser has 113.6 MHz repetition rate, 98 fs half-height full pulse width, and 101 nm 10 dB bandwidth. Second-order OAM mode fiber laser has 114.9 MHz repetition rate, 60 fs half-height full pulse width, and 100 nm 10 dB bandwidth. Compared with the reported schemes, our scheme has good performance in key parameters such as repetition rate, pulse width and spectral width. We believe that the OAM mode fiber laser with excellent performance is expected to be widely used in OAM communication, particle manipulation and other research fields.

Keywords: femtosecond fiber laser, orbital angular momentum, mode selective coupler

PACS: 42.60.Da, 42.50.Tx, 42.81.Qb

DOI: [10.7498/aps.73.20231085](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231085)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61505060, 61631166003, 61675081, 61735006, 61927817).

[†] Corresponding author. E-mail: liaochenchina@hust.edu.cn

百兆赫兹重频的轨道角动量模式飞秒光纤激光器

吴航 陈燎 李帅 杜禹璠 张驰 张新亮

Orbital angular momentum mode femtosecond fiber laser with over 100 MHz repetition rate

Wu Hang Chen Liao Li Shuai Du Yu-Fan Zhang Chi Zhang Xin-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 014204 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231085

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231085>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长周期多芯手征光纤轨道角动量的调制

Modulation of orbital angular momentum in long period chirally-coupled-cores fiber

物理学报. 2019, 68(6): 064211 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182036>

一种可用于轨道角动量的受激布里渊放大的光子晶体光纤放大器

Design of photonic crystal fiber amplifier based on stimulated Brillouin amplification for orbital angular momentum

物理学报. 2022, 71(7): 074206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211909>

基于双层超表面的宽带、高效透射型轨道角动量发生器

Wideband and high efficiency orbital angular momentum generator based on bi-layer metasurface

物理学报. 2021, 70(3): 038101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200975>

圆柱型光纤螺线圈轨道角动量模式

Orbital angular momentum mode of cylindrical spiral wave-guide

物理学报. 2020, 69(5): 054207 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190997>

海洋湍流对光子轨道角动量量子通信的影响

Effects of ocean turbulence on photon orbital angular momentum quantum communication

物理学报. 2022, 71(1): 010304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211146>

基于平面相控阵的轨道角动量涡旋电磁波扫描特性

Beam steering of orbital angular momentum vortex wave based on planar phased array

物理学报. 2021, 70(23): 238401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211119>