

文章编号 1004-924X(2023)23-3395-10

基于对称双模耦合器的波长可切换 柱矢量光纤激光器

裴思琪^{1,2,3}, 张天宇^{1,2,3}, 张 昆⁴, 杨博义^{1,2,3}, 朱 云^{1,2,3}, 胡佳鹏^{1,2,3},
刘学胜^{1,2,3*}, 刘友强^{1,2,3}, 王智勇^{1,2,3}

- (1. 北京工业大学 北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124;
2. 北京工业大学 跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124;
3. 北京工业大学 激光工程研究院 半导体光电先进技术研究, 北京 100124;
4. 中国电子科技集团公司第十一研究院 固体激光科学技术实验室, 北京 100015)

摘要:为了实现高纯度脉冲柱矢量光的输出, 提出并搭建基于对称双模耦合器的波长可切换的被动锁模柱矢量全光纤激光器。根据光纤传输原理得到基模向高阶模转换的折射率匹配直径, 运用模式耦合模理论及光束传播法模拟分析了对称双模耦合器的结构参数对模式选择及耦合特性的影响, 采用熔融拉锥法并免去传统的模式选择耦合器制作上的预拉锥工艺制作了对称双模耦合器, 通过搭建一套被动锁模柱矢量全光纤激光器实现了中心波长 1 039 nm 和 1 068 nm 可切换、脉冲时间间隔为 113.8 ns、重频为 8.78 MHz、脉宽 660 ps/656 ps、最大输出平均功率为 5.25 mW/5.2 mW、模式纯度大于 97% 的柱矢量光输出。实验验证了对称双模耦合器的可行性, 为后续高纯度柱矢量光的获得提供一种可行的方案。

关键词: 光纤激光器; 对称双模耦合器; 非线性偏振旋转锁模; 柱矢量光; 高纯度

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233123.3395

Wavelength-switchable cylindrical vector fiber laser based on symmetrical two-mode coupler

PEI Siqu^{1,2,3}, ZHANG Tianyu^{1,2,3}, ZHANG Kun⁴, YANG Boyi^{1,2,3}, ZHU Yun^{1,2,3}, HU Jiapeng^{1,2,3},
LIU Xuesheng^{1,2,3*}, LIU Youqiang^{1,2,3}, WANG Zhiyong^{1,2,3}

- (1. Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Key Laboratory of Trans-scale Laser Manufacturing Technology (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China;
3. Institute of Advanced Technology on Semiconductor Optics & Electronics, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
4. Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, No. 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

* Corresponding author, E-mail: liuxuesheng@bjut.edu.cn

收稿日期: 2023-06-25; 修订日期: 2023-08-01.

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (No. 1212009); 基础科研项目 (No. JCKY2021110B175); 快速支持计划资助项目 (No. 80914020105); 固体激光技术重点实验室开放基金资助项目

Abstract: To obtain high-purity cylindrical vector beam pulses, a wavelength-switchable passive mode-locked cylindrical vector beams all-fiber laser is proposed and constructed based on a symmetrical two-mode coupler. First, the refractive index matching diameter for the conversion from the fundamental mode to the higher-order mode was obtained based on the principles of fiber optic transmission. The influence exerted by the structural parameters of the symmetrical two-mode coupler on mode selection and coupling characteristics was analyzed, employing simulations of mode coupling theory and the beam propagation method. The symmetrical double-mode coupler was fabricated utilizing the fusion tapering method. This method eliminates the complicated pre-taper process commonly employed in traditional mode selection coupler production. Finally, a passive mode-locked all-fiber laser, based on the symmetrical two-mode coupler, was constructed. This laser showcases a switchable central wavelength of 1 039 nm and 1 068 nm, pulse repetition interval of 113.8 ns, repetition rate of 8.78 MHz, pulse durations of 660 ps/656 ps, and maximum output average power of 5.25 mW/5.2 mW. In addition, it achieves a mode purity of over 97% for the vector beam output. The conducted experiments validate the feasibility of the symmetrical two-mode coupler and present a viable solution for obtaining high-purity cylindrical vector beams in future applications.

Key words: fiber laser; symmetric two-mode coupler; nonlinear polarization rotation principle mode-locked; cylindrical vector beams; high mode purity

1 引 言

柱 矢 量 光 (Cylindrical Vector Beams, CVBs) 因其轴对称偏振分布和环形模场分布特性而受到广泛关注, 典型的 CVBs 包括径向偏振 (TM_{01}) 和角向偏振 (TE_{01}) 光束^[1]。CVBs 具有独特的光学特性, 广泛地应用于表面等离子体激光激发^[2]、超分辨率成像^[3-4]、光学存储^[5]、光学传感^[6]、光通信^[7-10]、粒子加速^[11]、光学操纵^[12]和材料加工^[13]等领域。CVBs 可以通过自由空间光学器件进行转换, 在中心点产生接近于零的强度, 如 q 板^[14]、涡旋相位板^[15-18]和空间光调制器^[19-20]等, 这种方法需要考虑环境稳定性以及精准的光路对齐, 因此常用于空间光路。相比之下, 通过光纤生成 CVBs 是一种紧凑且灵活的方法, 如偏芯耦合^[21]、光子灯笼^[22]、长周期光栅^[23]、特种光纤^[24]、少模光纤光栅^[25]和模式选择耦合器^[26]等。其中, 模式选择耦合器选模是实现模式转换最简单的方法, 可以获得较高的模式纯度, 并且生产成本低、稳定性强。相比于连续 CVBs, 脉冲 CVBs 具有高能量、高峰值功率, 在金属的微孔钻削^[27]、电子加速^[11]等领域有着潜在的应用价值。将 CVBs 产生方法与锁模技术相结合是一种有

效的高功率 CVBs 实现方案。2019 年, 南京邮电大学张祖兴等^[28]采用自制对称双模耦合器 (Symmetric Two Mode Coupler, STMC), 搭建了非线性偏振旋转 (Nonlinear Polarization Rotation Principle, NPR) 被动锁模 CVBs 光纤激光器, 实现了中心波长为 1 564.4 nm, 模式纯度为 90% 的脉冲 CVBs 输出。2020 年, 他们^[29]采用偏芯耦合和非线性环形镜锁模实现了中心波长为 1 066.9 nm, 模式纯度为 94% 的 CVBs。同年, 上海大学曾祥龙等^[30]采用非对称模式选择耦合器和 NPR 锁模技术, 实现了中心波长在 1 032~1 040 nm 可调的 TM_{01} 模输出。2022 年, 中国科学技术大学许立新等^[31]采用偏芯耦合结合半导体可饱和吸收镜 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM) 锁模技术实现了中心波长为 1 067.01 nm, 模式纯度为 92.4% 的 TM_{01} 模输出。根据国外近几年对柱矢量全光纤激光技术的研究, SESAM 锁模通常具有较低的损伤阈值, 相比于非线性环形镜锁模, NPR 锁模的光纤激光器结构更简单, 波长可调、调制深度大、响应时间短。

2018 年, 本课题组^[32]提出并搭建了基于液晶聚合物的纳秒脉冲掺镱主振荡器功率放大 (MO-PA) 系统, 采用空间相位转换法产生柱矢量光, 实现了中心波长为 1 064 nm, 模式纯度为 88.5%

的 TM_{01} 输出。本文采用全光纤产生 CVBs, 基于理论分析以及模式耦合机理, 采用两根 Corning SMF-28e 光纤设计并制作了一款 $1\ \mu\text{m}$ 波段可实现 LP_{01} 模向 LP_{11} 模高纯度转换的 STMC, 并用于波长可切换的被动锁模全光纤激光器产生脉冲 CVBs。该方法相比于传统的非对称模式选择耦合器免去了制作过程中的预拉锥工艺, 最大限度地简化了耦合器的制作成本与制造工艺。相比于目前的 STMC, 本文制作的 STMC 用于 $1\ \mu\text{m}$ 波段且模式转换纯度更高。

2 原理

2.1 理论分析

如图 1 所示, STMC 由完全相同的两根双模光纤 (Two Mode Fiber, TMF) 熔融拉锥制成, 在锥区和耦合区分别完成 LP_{11} 模的激发和输出。

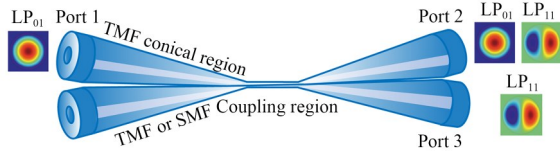


图 1 STMC 结构及工作原理

Fig. 1 Structure and principle of STMC

入射光从光纤的 Port 1 端口进入锥区后, 光纤归一化频率随着纤芯的变细逐渐变小, 使得越来越多的光渗入包层; 进入耦合区后, 两个光纤波导靠得很近时, 由于倏逝场的作用, 发生两个波导间的能量交换; 当光进入输出端锥区后, 归一化频率随纤芯的变粗逐渐增大, 使光以特定比例从两个输出端输出 STMC 的耦合区工作机理符合模式耦合理论^[33], 其耦合方程为:

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = jK_{21}A_2(z)e^{j(\beta_1 - \beta_2)z}, \quad (1)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = jK_{12}A_1(z)e^{j(\beta_2 - \beta_1)z}, \quad (2)$$

式中: $A_1(z)$, $A_2(z)$ 为两种模式耦合引起的幅度变化; β_1 , β_2 , z 为传播常数、光沿耦合区传输的距离; K_{12} , K_{21} 为耦合系数。由于入射光从 Port 1 端口进入, 此时, Port 3 端口在 $z=0$ 处没有电磁场,

满足 $P_{\text{in}} = |A_1(0)|^2$, $A_2(0)=0$ 。对式(2)进行积分得到:

$$A_2(L) = jK_{12} \int_0^L A_1(z) e^{j(\beta_2 - \beta_1)z} dz, \quad (3)$$

式中 $e^{j(\beta_2 - \beta_1)z}$ 为高速振荡因子。所以在耦合距离 L 内, 式(3)不会等于一个有效值, 即只有在传播常数相近 (有效折射率相等) 的两个模式或同一模式之间才能获得存在有效值的 $A_2(L)$, 此时才会发生有效的耦合。

经推导求得耦合器两输出端口的光功率为:

$$P_{\text{1out}} = |A_1(z)|^2 = \sin^2(K_c z), \quad (4)$$

$$P_{\text{2out}} = |A_2(z)|^2 = \cos^2(K_c z), \quad (5)$$

式中: $K_c = |K_{12}| = |K_{21}|$, 为耦合系数。由式(4)和式(5)可知, 在相位匹配的情况下两个波导中导模周期性地地进行功率转换。在光纤耦合器中, 光在耦合区传输时模式耦合导致其在两光纤间发生周期性的转换, 且当能量第一次从一根光纤耦合进另一根光纤时所传输的最短距离被称为最佳耦合长度。在 STMC 中对 TMF 进行拉锥激励出光纤中的高阶模, 在耦合区进行能量周期性交换以及模式耦合, 由于入射光是从第一根光纤中输入的, 第一根光纤的输出包含 LP_{01} 模和 LP_{11} 模, LP_{11} 模由第二根光纤输出。通过控制 TMF 锥区尺寸, 可以尽可能地将 LP_{01} 模限制在 TMF 纤芯中而不耦合到第二根 TMF 中, 将 LP_{11} 模泄漏到 TMF 包层中被较多地耦合出来。

2.2 波导仿真

Corning SMF-28e 纤芯直径为 $8.2\ \mu\text{m}$, NA 为 0.14, 算出归一化频率为 3.4。根据模式理论, 仅支持基本模式和第二高阶模式 TM_{01} , TE_{01} 和 HE_{21} (奇数和偶数), 其他高阶模态由于高损耗而不能维持^[31]。本文采用 Corning SMF-28e 作为 $1\ \mu\text{m}$ 波段的 TMF, SMF-28e 中模式被束缚在纤芯中传输的条件为 $1.457 < n_{\text{eff}} < 1.4637$ 。而当模式的有效折射率小于 1.457 时, 该模式会泄漏到包层中。TMF 的工作波长为 $1\ 064\ \text{nm}$, 采用有限元法 (Finite Element Method, FEM) 计算 TMF 中 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的有效折射率随光纤直径 (包层直径) 的变化规律, 结果如图 2 所示。

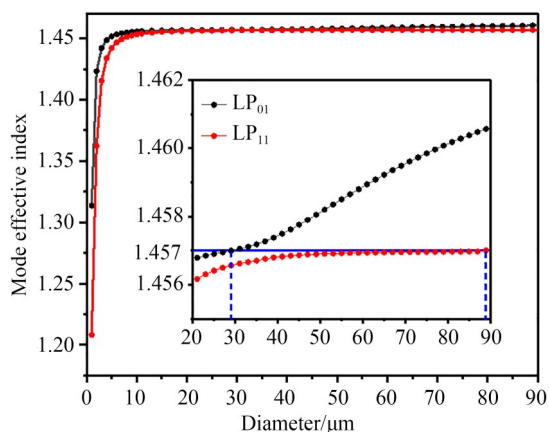
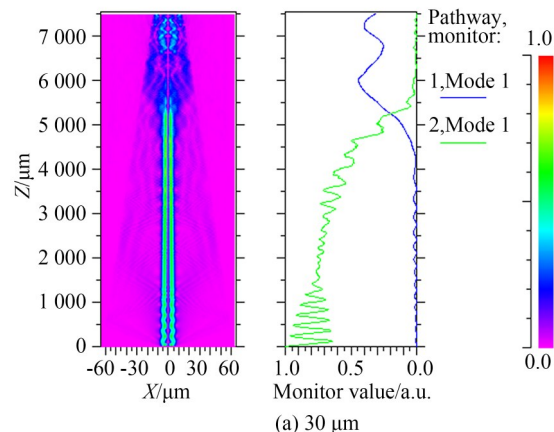
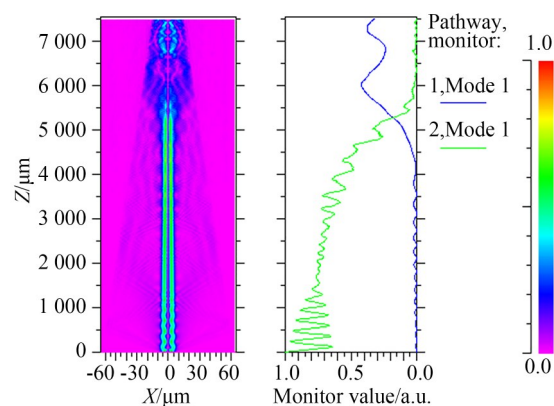


图2 有效折射率随光纤直径的变化曲线

Fig. 2 Variation of effective refractive index with fiber diameter

结合图2所示仿真结果,当光纤直径为89 μm 时,TMF中 LP_{11} 模的有效模式折射率为1.457,此时 LP_{11} 模开始往包层中泄漏,在STMC的耦合区开始发生 LP_{11} 模式的耦合,而 LP_{01} 模的有效模式折射率仍然满足: $1.457 < n_{\text{eff}} < 1.4637$, LP_{01} 模会被束缚在纤芯中传输,因此在STMC的耦合区几乎不会发生 LP_{01} 模的耦合。同理,当光纤直径为29 μm 时,TMF中 LP_{01} 模的有效模式折射率为1.457,此时 LP_{01} 模开始往包层中泄漏,在STMC的耦合区开始发生 LP_{01} 模的耦合。此时,port3输出端 LP_{11} 模的纯度会减小。因此,为了尽可能在耦合区少发生 LP_{01} 模式耦合,从而实现提高 LP_{11} 模的输出纯度,光纤锥腰部分的直径应介于29 μm 和89 μm 之间。

本文基于光束传播法(Beam Propagation Method, BPM)建立了STMC的锥区三维波导模型,设置工作波长为1 064 nm,TMF拉锥后的直径分别为30 μm 和31 μm ,锥区拉伸长度为7 500 μm 。将归一化功率值为单位1的 LP_{11} 模由未拉伸的端口处的纤芯注入,模拟结果如图3所示。由图可知,随着TMF直径的逐渐减小, LP_{11} 模逐渐从纤芯泄漏到包层中进行传输,当光纤直径被拉伸到30 μm 和31 μm 时, LP_{11} 模已经完全从纤芯中泄漏出来,而此时 LP_{01} 模还被束缚在纤芯中传输,几乎不会泄漏到包层中。由此可见,将TMF光纤直径拉伸到30 μm 和31 μm 时可以有效实现 LP_{01} 模与 LP_{11} 模的分离。

(a) 30 μm (b) 31 μm 图3 TMF拉锥过程中不同直径下 LP_{11} 模纵向能量流动仿真Fig. 3 Simulation of LP_{11} mode longitudinal energy flow during TMF cone pulling with different diameters after TMF cone pulling

根据锥区的仿真结果,本文采用光束传播法建立STMC的耦合区三维波导模型,设置工作波长为1 064 nm,耦合区TMF的直径分别为30 μm 和31 μm 。在任一TMF注入归一化功率值为单位1的 LP_{11} 模,模拟结果如图4所示。由图可知,耦合区的光纤直径为30 μm 和31 μm 之间的任一数值,两根光纤间的能量交换均呈现周期性变化的规律,当耦合长度合适时,第一根光纤中的 LP_{11} 模几乎可以完全耦合到第二根光纤中。不同的是,耦合区不同的光纤直径分别对应不同的最佳耦合长度,由图可知,耦合区光纤直径为30 μm 和31 μm 时对应的最佳耦合长度分别约为4.2 cm和4.7 cm。最后,基于上述STMC的仿真结果,设定锥区为6 000 μm ,耦合区为4.2 cm。采用熔融拉锥法将两根光纤拉锥至60 μm 完成

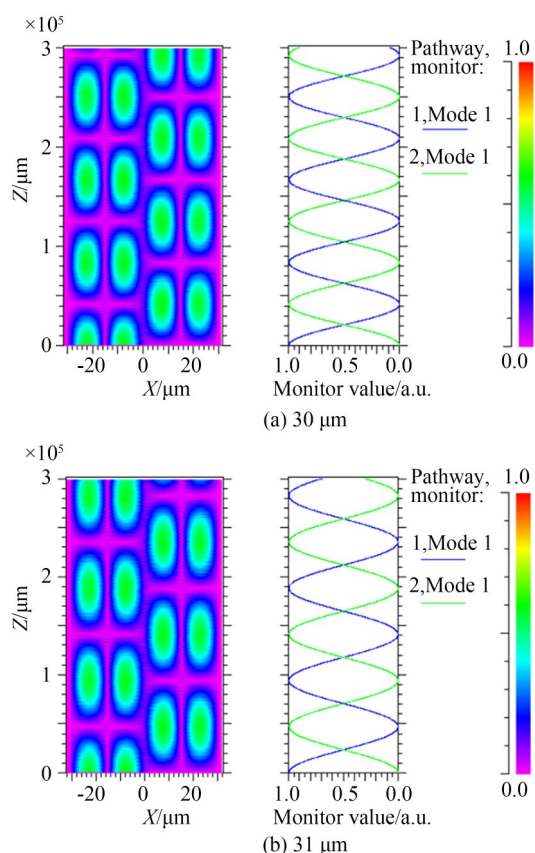


图4 不同光纤直径下STMC的能量流动仿真结果

Fig. 4 Energy flow simulation results of STMC with different diameters of TMF

了STMC的制作。

3 偏振模式转换理论

柱矢量光束横截面上任一点的偏振方向都与径向成一定夹角,其电场可以表示为:

$$E(r, \phi) = E_0(r) [\cos(\phi + \phi_0) \mathbf{e}_x + \sin(\phi + \phi_0) \mathbf{e}_y], \quad (6)$$

其中: $E_0(r)$ 为电场振幅, ϕ 为方位角, $\mathbf{e}_x$ 和 $\mathbf{e}_y$ 分别为 x 方向和 y 方向的单位矢量, ϕ_0 为电场矢量与径向的夹角。则柱矢量光的琼斯矩阵可以表示为:

$$J(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi + \phi_0) \\ \sin(\phi + \phi_0) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

当 $\phi_0 = 0$ 时, 径向偏振光的琼斯矩阵可以表示为:

$$J_{\text{radial}}(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix}. \quad (8)$$

当 $\phi_0 = \pi/2$ 时, 径向偏振光的琼斯矩阵可以表示为:

$$J_{\text{azimuthal}}(\phi) = \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (9)$$

如果两个快轴沿 y 轴方向的 $1/2$ 波片以任意角度 θ_i 放置, 则会产生如下给出的 CVBs 光束:

$$T = R(-\theta_2) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} R(\theta_2) R(-\theta_1) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} R(\theta_1) J(\phi) = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 \\ \sin 2\theta_2 & -\cos 2\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 & -\cos 2\theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi + \phi_0) \\ \sin(\phi + \phi_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi + \phi_0 + 2(\theta_2 - \theta_1)) \\ \sin(\phi + \phi_0 + 2(\theta_2 - \theta_1)) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: $R(\theta_i)$ 是线性基的旋转矩阵, θ_i 为波片旋转角度。当 $2(\theta_1 - \theta_2) = \phi_0$, 式(10)可以简化为 $J_{\text{radial}}(\phi)$, 转换为径向偏振光; 当 $2(\theta_1 - \theta_2) + \phi_0 = \pi/2$ 时, 式(10)可以简化为 $J_{\text{azimuthal}}(\phi)$, 转换为角向偏振光。从式(10)可以看出, 通过两个 $1/2$ 波片可以实现径向偏振光和角向偏振光的转换。

偏振控制器为三桨光纤偏振控制器, 利用应力引起的双折射形成独立的波片, 从而改变单模光纤中透射光的偏振方向。3个分数波片是沿着3个独立的缠绕盘环绕光纤而产生的。可将偏振控制器缠绕为两个 $1/2$ 波片, 实现偏振转换。

4 实验及结果分析

4.1 实验装置

本文提出的基于STMC的全光纤CVBs光纤激光器实验装置如图5所示。泵浦源为最大输出功率为830 mW的980 nm半导体激光器, 通过980 nm/1 064 nm的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)将泵浦能量耦合进谐振腔内, 增益光纤为掺镱光纤(Ytterbium Doped Fiber, YDF), 长度为2 m, 它在975 nm处的吸收系数为250 dB/m。偏振相关隔离器(Polarization Dependent Isolator, PDI)置于环形腔中起到偏器的作用, 同时能够保证谐振腔内的光单向

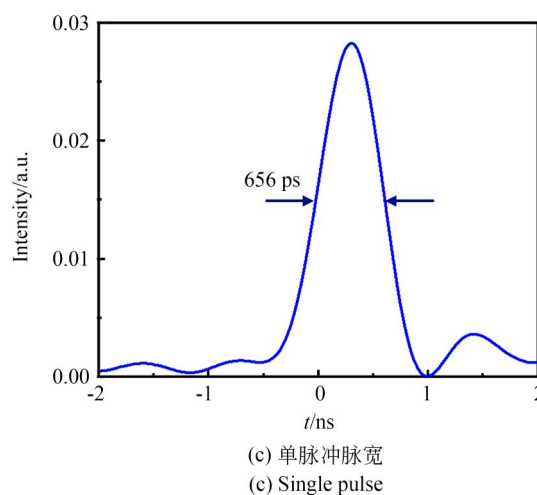
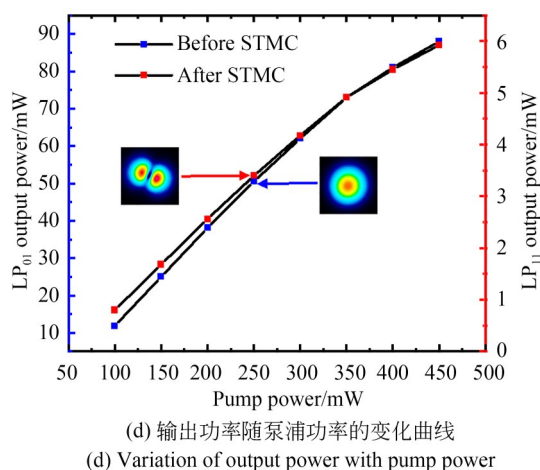
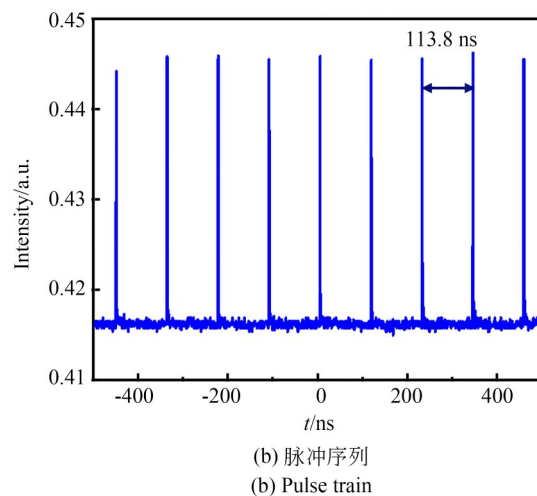
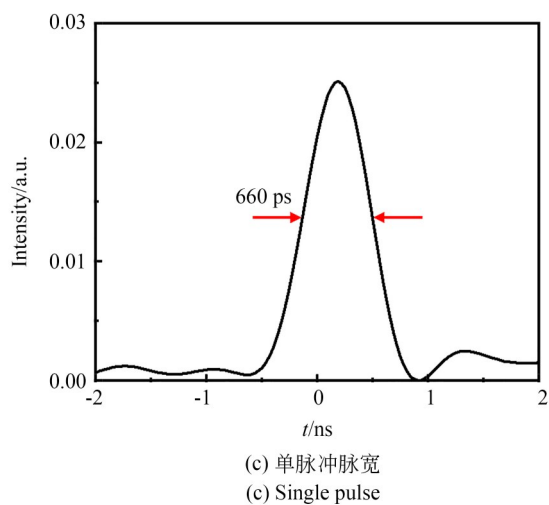


图 6 泵浦功率为 300 mW、中心波长为 1 038.97 nm 时锁模光纤激光器的输出特性

Fig. 6 Output characteristics of mode-locked fiber laser at pump power of 300 mW with central wavelength of 1 038.97 nm

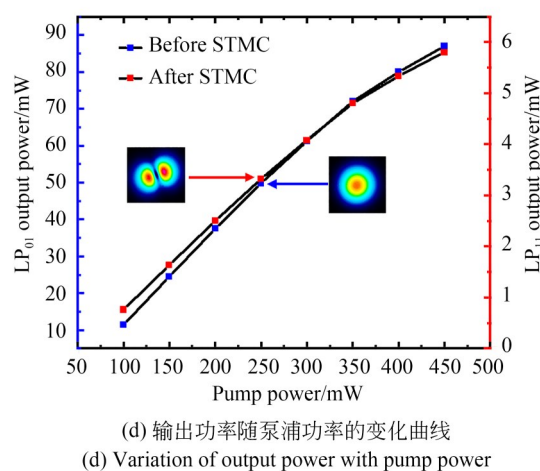
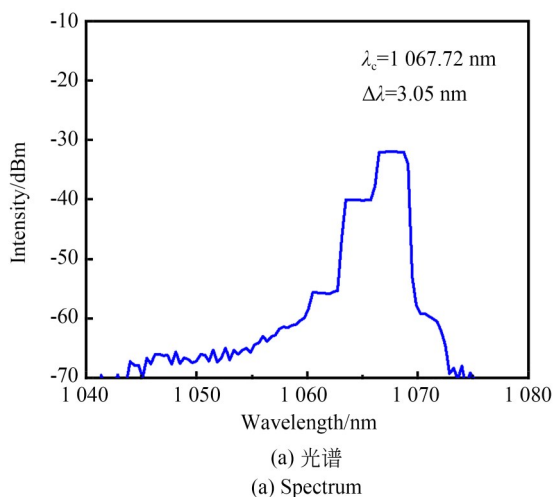


图 7 泵浦功率为 300 mW、中心波长为 1 067.72 nm 时锁模光纤激光器的输出特性

Fig. 7 Output characteristics of mode-locked fiber laser at pump power of 300 mW with central wavelength of 1 067.72 nm

输出功率与泵功率的变化曲线,可以看出,激光的平均输出功率和泵功率呈线性正相关,也受腔损耗和泵功率,LP₁₁模式的最大平均输出功率是 5.5 mW,通过计算得到 STMC 的模式转换效率为 6.67%。插图 8 为激光输出光斑的模式强度分布。

当泵浦功率为 300 mW,中心波长为 1 038.97 nm 时,在 PC3 后加入准直器,精准调节 PC3,通过电耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 可以观察到 CVBs 输出。为了验证光斑模式,在 CCD 和偏振控制器之间加入线偏振片作为起偏器,随着线偏振片的旋转可以分辨出 TM₀₁ 模和 TE₀₁ 模,图 8(a)~8(j) 显示了径向偏振光束和角向偏振光束的模式强度分布,以及它们通过不同

方向的线性偏振器后的模场强度分布。计算 TM₀₁ 和 TE₀₁ 模的纯度分别为 97.18% 和 97.07%。同理,在中心波长为 1 067.72 nm 时 TM₀₁ 和 TE₀₁ 模的纯度分别为 97.09% 和 97.03%。

CVBs 的转换效率相对较低,这里由于 STMC 本身的设计和制作过程的影响。首先,在 STMC 的制作过程中为了获得高纯度的 LP₁₁ 模式,LP₁₁ 模式应尽可能地泄漏到包层中,而 LP₀₁ 模式应限制在光纤芯中。因此,LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的分离达到最大程度,这需要在耦合区域有一个特定的光纤直径范围,从而限制 STMC 的 CVB 输出功率。其次,理论仿真与实验制作存在误差,后续可以通过优化拉锥参数以及工艺参数来优化器件。

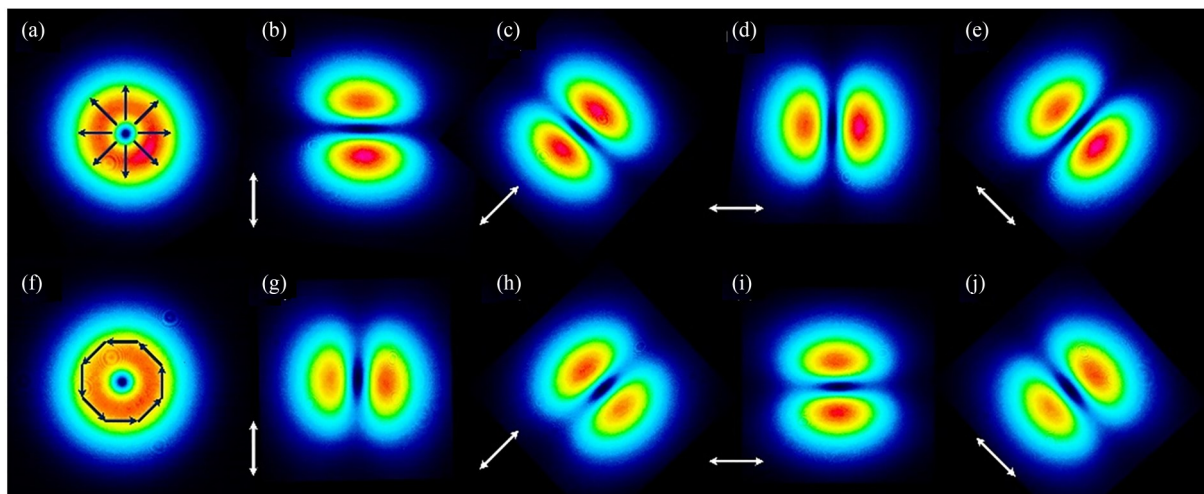


图 8 输出光模场强度分布特性:(a) TM₀₁ 模;(b~e) TM₀₁ 模通过不同方向的线偏振片后的模场强度分布;(f) TE₀₁ 模;(g~j) TE₀₁ 模通过不同方向的线偏振片后的模场强度分布

Fig. 8 Output optical mode field intensity distribution characteristics: (a) TM₀₁ mode; (b-e) The mode field intensity distribution of TM₀₁ under rotation of the linear polarizer; (f) TE₀₁ mode; (g-j) The mode field intensity distribution of TE₀₁ under rotation of the linear polarizer

5 结 论

本文设计并制作了一种能实现 LP₀₁ 模向 LP₁₁ 模高纯度转换的 1 μm 波段 STMC,并提供了一种 CVB 全光纤锁模激光器设计方案。最终,获得了工作中心波长为 1 038.97 nm/1 067.72 nm,重复频率为 8.78 MHz,脉冲宽度为 660 ps/656 ps,最大输出平均功率为 5.25

mW/5.2 mW,模式纯度为 97.18%/97.09% 和 97.09%/97.03% 的 TM₀₁ 和 TE₀₁ 模输出。使用 Corning SMF-28e 光纤成功制作 STMC,获得了超高模纯度的 CVB 输出,简化了模式选择耦合器的制作工艺,降低了制造成本。未来,通过后续工艺优化来提升模式转换效率,该 STMC 有望应用于高功率 CVB 全光纤激光器中。

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] TUGCHIN B N, JANUNTS N, KLEIN A E, *et al.* Plasmonic tip based on excitation of radially polarized conical surface plasmon polariton for detecting longitudinal and transversal fields[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(10): 1468-1475.
- [3] YU W T, JI Z H, DONG D S, *et al.* Super-resolution deep imaging with hollow Bessel beam STED microscopy[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(1): 147-152.
- [4] KOZAWA Y, MATSUNAGA D, SATO S. Superresolution imaging via superoscillation focusing of a radially polarized beam [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 86.
- [5] ZHAN Q W. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization [J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3377-3382.
- [6] MA Y B, RUI G H, GU B, *et al.* Trapping and manipulation of nanoparticles using multifocal optical vortex metalens [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 14611.
- [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] QIAO W, LEI T, WU Z T, *et al.* Approach to multiplexing fiber communication with cylindrical vector beams[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2579.
- [9] WANG C F, YANG B, CHENG M L, *et al.* Cylindrical vector beam multiplexing for radio-over-fiber communication with dielectric metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38666-38681.
- [10] CHEN S Q, XIE Z Q, YE H P, *et al.* Cylindrical vector beam multiplexer/demultiplexer using off-axis polarization control[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 222.
- [11] MARCEAU V, APRIL A, PICHE M. Electron acceleration driven by ultrashort and nonparaxial radially polarized laser pulses [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2442.
- [12] WANG X Y, ZHANG Y Q, DAI Y M, *et al.* Enhancing plasmonic trapping with a perfect radially polarized beam [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 847 - 852.
- [13] MEIER M, ROMANO V, FEURER T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation [J]. *Applied Physics A*, 2007, 86(3): 329-334.
- [14] YAN L, GREGG P, KARIMI E, *et al.* Q-plate enabled spectrally diverse orbital-angular-momentum conversion for stimulated emission depletion microscopy[J]. *Optica*, 2015, 2(10): 900-903.
- [15] HELL S W, WICHMANN J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(11): 780-782.
- [16] BALZAROTTI F, EILERS Y, GWOSCH K C, *et al.* Nanometer resolution imaging and tracking of fluorescent molecules with minimal photon fluxes [J]. *Science*, 2017, 355(6325): 606-612.
- [17] EILERS Y, TA H S, GWOSCH K C, *et al.* MINFLUX monitors rapid molecular jumps with superior spatiotemporal resolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(24): 6117-6122.
- [18] HNATOVSKY C, SHVEDOV V G, SHOSTKA N, *et al.* Polarization-sensitive femtosecond laser ablation with tightly focused vortex pulses[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics 2012. San Jose, California. Washington, D. C. : OSA*, 2012, 37(2): 226-228.
- [19] BASHKANSKY M, PARK D, FATEMI F K. Azimuthally and radially polarized light with a nematic SLM [J]. *Optics Express*, 2009, 18(1): 212-217.
- [20] HE Y L, YE H P, LIU J M, *et al.* Order-controllable cylindrical vector vortex beam generation by using spatial light modulator and cascaded metasurfaces[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1-10.
- [21] 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.
- GROSJEAN T, COURJON D, SPAJER M. An all-fiber device for generating radially and other polarized light beams [J]. *Optics Communications*, 2002, 203(1/2): 1-5.
- [22] BIRKS T A, GRIS-SÁNCHEZ I, YEROLATSIS S. The photonic lantern[C]. *CLEO: 2014. San Jose, California. Washington, D. C. : OSA*,

- 2014, 7(2):107-167.
- [23] LIU T, CHEN S P, QI X, *et al.* High-power transverse-mode-switchable all-fiber picosecond MOPA [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (24) : 27821-27827.
- [24] LI J L, WANG C C, WANG W Q. Generation of an azimuthally polarized beam with a metallic ring core fiber [J]. *Applied Optics*, 2013, 52 (32) : 7759-7768.
- [25] LI H X, YAN K, ZHANG Y M, *et al.* Low-threshold high-efficiency all-fiber laser generating cylindrical vector beams operated in LP_{11} mode throughout the entire cavity [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(12): 122502.
- [26] 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.
- [27] XU Y, CHEN S, WANG Z Q, *et al.* Cylindrical vector beam fiber laser with a symmetric two-mode fiber coupler [J]. *Photonics Research*, 2019, 7 (12): 1479-1484.
- [28] LU Y Q, LIU S, ZHANG Z X. High power mode-locked fiber laser with cylindrical vector beam generation[J]. *Optik*, 2020, 223: 165623.
- [29] SHI F, YAO H, HUANG Y P, *et al.* Wavelength-switchable all-fiber laser-emitting radially polarized beams [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(4) : 1206-1211.
- [30] DAI C S, DONG Z P, ZHANG Y M, *et al.* Mode-locked fiber laser generating cylindrical vector beams based on an all-polarization-maintaining fiber structure [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107592.
- [31] 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.
- [32] 贾文增, 刘学胜, 司汉英, 等. 基于 LCP 径向偏振光输出的掺镱 MOPA 脉冲光纤激光器[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5):997-1004.
- JIA W Z, LIU X SH, SI H Y, *et al.* Yb-doped fiber MOPA system with radially polarized output beam based on LCP vortex retarder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(5):997-1004. (in Chinese)
- [33] 王健. 导波光学[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- WANG J. *Waveguide Optics*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. (in Chinese)

作者简介:



裴思琪(1999—),女,湖北随州人,硕士研究生,2017年于湖北汽车工业学院获得学士学位,主要从事柱矢量光纤激光器方面的研究。E-mail: Peisqi@emails.bjut.edu.cn

通讯作者:



刘学胜(1980—),男,北京人,副研究员,硕士生导师,2009年于北京工业大学获得博士学位,主要的研究领域包括先进光纤激光器、全固态激光器、超快激光器及其在工业加工领域中的应用。E-mail: liuxuesheng@bjut.edu.cn