

## 基于LCP径向偏振光输出的掺镱MOPA脉冲光纤激光器

贾文增, 刘学胜, 司汉英, 杨松, 王智勇

引用本文:

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 Wen-zeng, LIU Xue-sheng, SI Han-ying, et al. Yb-doped fiber MOPA system with radially polarized output beam based on LCP vortex retarder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 997–1004.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.0997>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 可调谐锁模光纤激光器泵浦的超连续谱光源

Tunable mode-locked fiber laser pumped supercontinuum source

光学精密工程. 2018, 26(1): 25–30 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182601.0025>

#### 全固态210 nm准连续深紫外激光器

All-solid-state 210 nm quasi-continuous deep ultraviolet laser

光学精密工程. 2016, 24(10s): 212–215 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0212>

#### 激光加工用5 kW光纤耦合半导体激光器

5 kW fiber coupling diode laser for laser processing

光学精密工程. 2015, 23(5): 1279–1287 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1279>

#### 高功率窄线宽微秒脉冲1 064 nm环形腔激光

High-power narrow linewidth microsecond pulse 1064 nm ring laser

光学精密工程. 2016, 24(10s): 35–40 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0035>

#### LD端面泵浦铯蒸气激光器的模式匹配

Mode matching of LD-end-pumped cesium vapor laser

光学精密工程. 2015, 23(10): 2755–2760 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152310.2755>

文章编号 1004-924X(2020)05-0997-08

# 基于 LCP 径向偏振光输出的 掺镱 MOPA 脉冲光纤激光器

贾文增<sup>1,2,3</sup>, 刘学胜<sup>1,2,3\*</sup>, 司汉英<sup>4</sup>, 杨松<sup>1,2,3</sup>, 王智勇<sup>1,2,3</sup>

- (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, 北京 100124;
4. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

**摘要:**为实现光纤激光器径向偏振光的高效输出,提出并搭建了基于液晶聚合物(LCP)的纳秒脉冲掺镱(Yb)主振荡器功率放大(MOPA)系统。该系统采用空间相位转换法,利用 LCP 涡旋半波片将全光纤 MOPA 激光器输出的高功率、窄线宽、线偏振、高斯形分布的纳秒脉冲信号转换为横向强度呈空心环状分布的拉盖尔-高斯光。MOPA 激光器系统由窄线宽连续种子源、电光强度调制器和后续的 5 级 YDF 放大器组成,通过实验获得了 20.1 W 的稳定 LP<sub>01</sub>模输出。而后的 LCP 涡旋波片用作空间模式转换器,最终获得的平均输出功率为 19.5 W,脉宽为 10 ns,重复频率为 10 kHz,横向剖面呈规则空心环形的径向偏振光输出,模式转换效率可达 97%。另外,通过 PBS 测量法测得径向偏振光的模式纯度约为 88.5%,兼具高功率与高纯度的优势。

**关键词:**光纤激光器;径向偏振光;主控振荡器的功率放大器;空间相位转换;高功率;高纯度

**中图分类号:**TN248 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202805.0997

## Yb-doped fiber MOPA system with radially polarized output beam based on LCP vortex retarder

JIA Wen-zeng<sup>1,2,3</sup>, LIU Xue-sheng<sup>1,2,3\*</sup>, SI Han-ying<sup>4</sup>, YANG Song<sup>1,2,3</sup>, WANG Zhi-yong<sup>1,2,3</sup>

- (1. Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
  2. Key Laboratory of Trans-scale Laser Manufacturing Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
  3. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
  4. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)
- \* Corresponding author, E-mail: liuxuesheng@bjut.edu.cn

**Abstract:** This study demonstrates the use of a Liquid Crystal Polymer (LCP) vortex retarder-based

收稿日期:2019-11-14;修订日期:2020-01-06.

基金项目:国防科工局支持重点实验室基金资助项目;北京市 19 科技创新服务能力建设-基本科研业务费(科研类)  
(No. 101000546319528)

Yb-Doped Fiber (YDF) MOPA system with nanosecond pulse output to achieve efficient generation of a radially polarized beam from fiber lasers. The LCP vortex half-wave plate was employed as a mode converter after the MOPA laser to efficiently convert the high-peak-power, narrow-linewidth, linearly polarized nanosecond Gaussian pulse signal into a Laguerre-Gaussian beam with a hollow-ring distribution of transverse intensity using the spatial phase conversion method. When the MOPA system consisted of a narrow-linewidth continuous seed source, an electro-optical intensity modulator and a five-stage YDF amplifier were built up. A stable  $LP_{01}$  mode output with an average power of 20.1 W was obtained from the MOPA system. Subsequently, an LCP vortex half-wave plate was adopted as a spatial mode converter and a radially polarized beam output with a maximum average output power of 19.5 W, pulse width of 10 ns, and perfect hollow-ring transverse intensity was obtained at a repetition rate of 10 kHz. The mode purity measured by the PBS method is about 88.5%, which indicates that the radially polarized beam obtained has the advantages of high efficiency and high mode purity. This work can establish the foundation for the practical and highly efficient applications of radially polarized beams in the field of optical trapping, high-resolution imaging, and materials processing.

**Key words:** fiber laser; radially polarized beam; Master Oscillator Power-Amplifier (MOPA); space conversion of phase; high-power; high mode purity

## 1 引言

近年来,具有轴对称场振幅分布和径向(或方位角)偏振态的圆柱矢量光束(Cylindrical Vector Beams, CVBs)开始受到越来越多研究者的青睐。理想的径向偏振光束其中心强度为 0,光斑呈空心环形,偏振方向沿径向分布,具有高数值孔径聚焦特性<sup>[1]</sup>。得益于此,径向偏振光在光学捕获<sup>[2]</sup>、超分辨率成像<sup>[3-4]</sup>、相位奇点研究<sup>[5]</sup>、信息加密<sup>[6]</sup>和材料加工<sup>[7-9]</sup>等领域体现出了巨大的应用价值与潜力。

目前,可产生径向偏振光的方法已有多种,比较典型的如晶体热致双折射效应法<sup>[10]</sup>、模式叠加干涉法<sup>[11]</sup>、空间相位转换法<sup>[12]</sup>等。第一种方法用于激光器谐振腔内,通过“滤波”对输出模式进行选择,光路设计较为复杂;后两种方法都是通过腔外对线偏光进行组合、变换来实现径向偏振光输出。据报道,利用  $CO_2$  激光器<sup>[13]</sup>、Nd:YAG 放大器<sup>[14]</sup>、碟片多通放大器<sup>[15]</sup> 和一个晶体-光纤相结合的放大器<sup>[16]</sup> 已实现了 CVBs 最大功率达到 3 kW 的连续波(Continuous Wave, CW)输出和平均功率超过 600 W 脉冲(QCW)输出。传统的气体及固体激光器<sup>[17]</sup> 相比于光纤激光器仍存在体积大、效率低、可靠性差、运行及维

护成本高等缺陷,所以基于光纤激光器实现大功率 CVBs 激光输出是近年来的研究热点。

2017 年,Shankar 等采用标准单模光纤(Single-mode Fiber, SMF)和自定义空心光纤制作的新型全光纤熔接耦合器<sup>[18]</sup>,通过适当的相位匹配将 SMF 中的基模直接耦合到  $TM_{01}$  或  $TE_{01}$  模式,其效率分别为 67% 和 85%,偏振纯度分别可达 70% 和 82%。2018 年,Wan 等首次以熔融模耦合器作为横向模式转换器和选择器,以声光调制器为主动调 Q 元件,采用全光纤主动调 Q 掺 Yb 激光器产生 CVBs<sup>[19]</sup>。通过调节腔内的偏振控制器,在重复频率为 30 Hz、泵浦功率为 150 mW 时得到了脉冲宽度为 68 ns、脉冲能量为 3.46  $\mu$ J、峰值功率为 50.1 W 的 CVBs,测得的模式纯度高达 93.5% 以上。2018 年,Lin 等报道了一个以增益开关 LD 作种子源的 YDF 主控振荡器的功率放大器(Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA)系统<sup>[20]</sup>,采用 q 波片作为模式转换器,有效地将线偏振高斯光束转换为空心环形径向偏振光束,其平均功率为 42 W,单脉冲能量为 30.7  $\mu$ J,脉冲持续时间为 110 ps。最终通过提高其重复频率至 5.468 MHz,实现了平均功率超过 100 W 的径向偏振光输出。

本文搭建了一个高峰值功率、窄线宽、纳秒脉冲全光纤 MOPA 激光器,系统采用全保偏结构。

通过涡旋波片将激光器输出的线偏光转换为径向偏振光,得到了平均输出功率可达 19.5 W、横向剖面呈完美空心环形的径向偏振涡旋光束,并采取 PBS 测量法测得其模式纯度约为 88.5%。目前,这种利用掺镱光纤激光器产生 10 ns 量级、窄线宽又兼具高功率与高纯度的径向偏振光的研究在国内外尚无报道。

## 2 模式转换原理

通过在腔外光路中引入空间相位转换器,实现线偏振高斯光束向径向偏振拉盖尔-高斯光束的转换。一束沿 Z 轴正向传播的准单色平面波的横向电场可表达如下<sup>[11]</sup>:

$$E(r, \theta, z) = E_r(r, \theta, z)\mathbf{r} + E_\theta(r, \theta, z)\boldsymbol{\theta}, \quad (1)$$

其中径向偏振和角向偏振的电场分别为:

$$E_r = E_s \cos \theta + E_p \sin \theta, \quad (2)$$

$$E_\theta = E_s \sin \theta - E_p \cos \theta, \quad (3)$$

其中:  $s$  和  $p$  表示横向且互相正交的两个电场矢量;  $\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}$  为极坐标下两方向矢量。

入射水平偏振光和实验中用到的涡旋波片的琼斯矩阵表达式<sup>[21-22]</sup>分别为:

$$\mathbf{E}_s = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{hw} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (5)$$

由此,线偏振光透过涡旋波片后的电场变为:

$$\mathbf{E}_{rad} = \mathbf{M}_{hw} \times \mathbf{E}_s = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

式(6)与径向偏振光电场表达式(2)是一致的,说明涡旋波片确实实现了由线偏光向径向偏振光的转换。

## 3 实验装置

实验装置如图 1 所示,由多级掺镱光纤(Yb-doped Fiber, YDF)放大器、空间模式转换元件及探测模块组成。其中,种子源(Seed)采用 1 064 nm 窄线宽连续光纤激光器(NKT Photonics, Koheras New Basik Y10),其输出功率为 10 mW,线宽 20 kHz。为弥补电光强度调制器(EOIM)的插入损耗,先对种子光进行一次预放大。采用 iXblue 的 EOIM (NIR-MX-LN-10)对连续种子光进行

调制,设置任意函数发生器调制信号的脉冲宽度为 10 ns,重复频率为 10 kHz,将得到的激光脉冲序列注入后面的 5 级 YDF 放大器链进行放大。

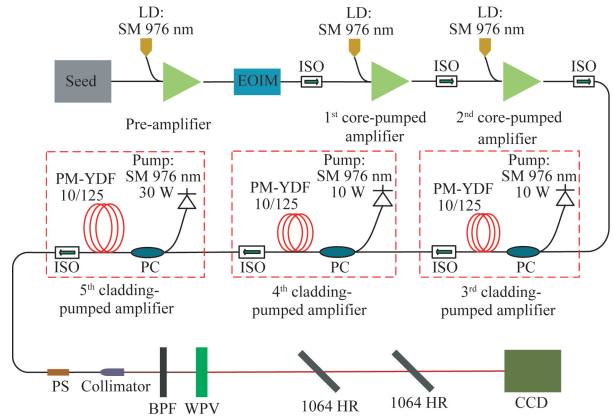


图 1 径向偏振光输出的 YDF MOPA 激光器实验装置  
Fig. 1 Schematic of Ytterbium-doped fiber MOPA laser with radially polarized beam output

前两级预放大器选用高掺杂保偏增益光纤(Nufern PM-YDF-HI-HP),纤芯直径为 6 μm,包层直径为 125 μm,光纤长度分别取 1 m 和 1.5 m。信号光和泵浦光经泵浦耦合器(PC)耦合进增益光纤,其后的带通滤波器(BPF)用于滤除剩余的泵浦光和由于芯层泵浦而产生的自发辐射光(ASE)。

为进一步提高脉冲信号的光功率,后 3 级包层泵浦放大器均采用大模场双包层掺 Yb 光纤作为增益介质,多模激光二极管(LD)作为泵浦源。第三和第四级包层泵浦放大器均通过一个(2+1)×1 型合束器将最大功率为 10 W 的 LD 泵浦光耦合进长度分别为 2 m 和 4 m 的大模场保偏光纤(Nufern PLMA-YDF-10/125-M),其包层对 976 nm 泵浦光的吸收效率为 4.95 dB/m。最后一级主放大器则采用具有更大模场的保偏光纤(Nufern PLMA-YDF-30/250-VIII)用作增益介质,增益光纤长度为 4.5 m,对 976 nm 包层泵浦光的吸收效率为 4.95 dB/m。LD 泵浦源的最高输出功率为 30 W,结构与前两级包层泵浦放大器相同。3 级主放大器的(2+1)×1 型合束器均剩余一个泵浦端,实验过程中分别通过测量其功率实现对反向光的实时监测,当反向光的功率出现非线性增长时,说明主放大器中产生了受激布里渊散射(SBS)效应,应停止增大泵浦光。同时,为防止反向光对泵浦源和光纤器件造成损坏,各级放大器之后都设置了光隔离器(ISO)。另外,这里

在第三级包层泵浦放大后做了 12 cm 的泵浦倾泻 (PS), 通过剥除增益光纤的外包层并涂上高折胶 (DSM 950-200,  $n=1.55$ ), 使外包层中传播的泵浦光因不满足全反射条件而溢出。最后, 信号光经带尾纤的准直器(collimator)输出, 准直光斑直径为 3 mm。

在准直器之后, 这里使用一个液晶聚合物(LCP)涡旋半波片(Thorlabs WPV10L-1064)作为横向空间模式转换器。LCP 涡旋波片由两块直径 23 mm、厚度 1 mm 的 N-BK7 玻璃片及夹在中间的 LCP 薄膜组成, 使用光取向技术设置 LCP 分子的方向, 生成连续旋转的快轴, 旋转点位于波片的中心。LCP 涡旋波片对通过它的  $1.064 \mu\text{m}$  的偏振激光提供恒定的半波延迟, 而其快轴的方向  $\theta$  关于波片的方位角  $\varphi$  不停旋转, 遵循如下的方程:  $\theta = \varphi/2 + \delta$  ( $\delta$  是  $\varphi = 0$  时波片快轴的方向角)。因此, 当涡旋波片的快轴相对于入射线偏振高斯光束的角度合适时, 可以形成不同的 CVBs, 包括径向偏振和方位角偏振。该涡旋波片的传输效率高达 98% 以上, 由此产生的矢量转换光束在光束质量方面的退化可以忽略不计。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 LCP 径向偏振光的输出特性

为获得高峰值功率、窄频谱带宽的脉冲序列, 光路中采用 BPF 滤除泵浦光与 ASE, 同时对前置放大器链的光纤长度进行了优化, 使得由自相位调制(SPM)引起的频谱展宽和由受激拉曼散射(SRS)诱导的功率转移达到最小。

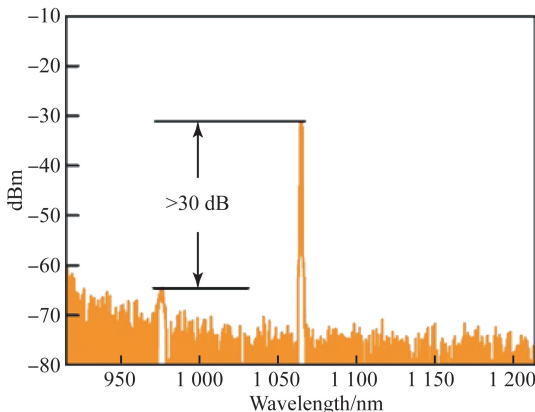


图 2 包层泵浦主放大器的输出光谱

Fig. 2 Spectra measured after cladding-pumped master amplifiers

图 2 是全光纤 MOPA 激光器在平均输出功率为 20 W 时, 使用光谱仪(横河 6370C)测量的光谱分布, 可见其中心波长为 1 064 nm, 信噪比(信号光-泵浦光)大于 30 dB, ASE 也得到了很好的抑制。

LCP 涡旋波片安装在一个 5 维可调的调整架上, 这样既可以保证信号光束能入射到波片的中心, 同时也可以很容易地将它移入或从信号光路中移除, 从而允许 MOPA 系统可根据需要在径向偏振拉盖尔高斯  $\text{TM}_{01}$  模式和线偏振高斯  $\text{LP}_{01}$  模式下切换。图 3 显示了 MOPA 系统在  $\text{LP}_{01}$  (灰色) 和  $\text{TM}_{01}$  (红色) 模式下运行时的平均输出功率随最后一级主放大器泵浦功率变化的函数(彩图见期刊电子版)。由图 3 可见, 当泵浦功率为 26.5 W 时, 获得了平均输出功率为 19.5 W 的  $\text{TM}_{01}$  模径向偏振光, 计算可得它相对于泵浦功率的斜效率约为 66%。相比之下, 此时  $\text{LP}_{01}$  模式的平均输出功率为 20.1 W, 模式转换效率可达 97%。此时, 整个激光器系统总的注入泵浦功率为 36.06 W, 则系统的斜效率为 54%。用 200 MHz 带宽的光电探测器(CONQUER, PR-200M3150) 和 500 MHz 带宽的数字示波器(Tektronix, DPO4054B) 直接测量光脉冲的时间分布, 如图 4 所示。在最大功率输出时, 脉冲持续时间由调制后的 10 ns 减小到 7.5 ns, 这是由于在放大过程中强度更大的脉冲中心区域从主放大器提取的能量比脉冲前沿及后沿高得多, 导致脉宽被压缩<sup>[23]</sup>。

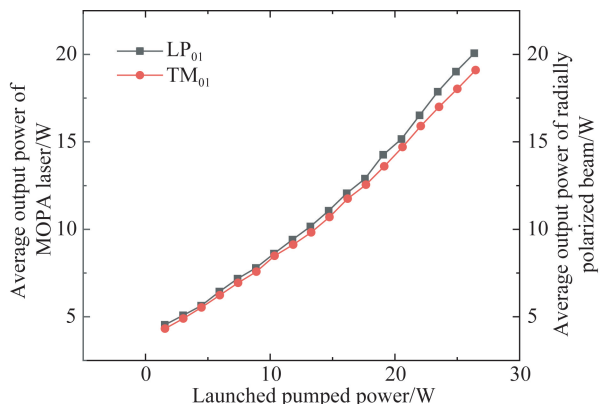


图 3  $\text{TM}_{01}$  和  $\text{LP}_{01}$  模式平均输出功率随注入泵浦功率的变化

Fig. 3 Average output power of  $\text{TM}_{01}$  and  $\text{LP}_{01}$  modes versus launched pump power

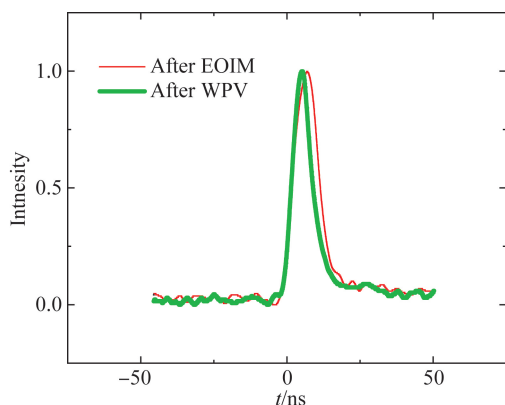


图 4 经 EOIM 和 LCP 涡旋波片调制后的脉冲时间分布  
Fig. 4 Temporal pulse shapes after EOIM and LCP vortex retarder

图 5(a)和图 5(b)分别显示了  $LP_{01}$  和  $TM_{01}$  模式在最大功率输出时远场测量的光束强度分布图。随着输出功率的增加,空心环形的强度剖面得到了很好的保持,并且如文献[24]报道一样,在输出端设置一对  $1/4$  波片和  $1/2$  波片,可以有效地保持光束径向偏振的状态。

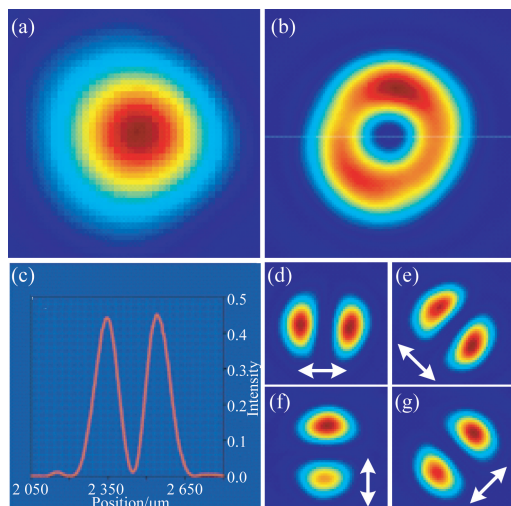


图 5 最大功率运行时的光束轮廓。(a)  $LP_{01}$  模式; (b)  $TM_{01}$  模式; (c) 输出 20.03 W 光束中心处的二维强度剖面; (d)~(g) 光束经过旋转线偏振器后的光强分布

Fig. 5 Typical beam profiles at maximum output power. (a)  $LP_{01}$  mode; (b)  $TM_{01}$  mode; (c) One-dimensional intensity profile across the beam center at 20.03 W; (d)~(g) Beam intensity distributions after passing through a rotated linear polarizer

图 5(c)为输出功率为 20.03 W 时径向偏振光的二维强度分布(沿图 5(b)中白线的方向),光斑中心处光强基本为零,两侧强度呈圆对称分布,说明此时得到的径向偏振光束是比较理想的。图 5(d)~5(g)则显示了当通过并旋转线偏振器时  $TM_{01}$  模式的横向强度分布,白色箭头表明了偏振器的透振方向。

在激光器输出功率逐渐升高的过程中,径向偏振  $TM_{01}$  模光束的强度分布变化规律如图 6(a)~6(h)所示。由图可见,光束剖面呈明显的空心环形,椭圆度接近 1(0.88~0.96 不等)且在不同功率水平下变化并不大( $<10\%$ )。由此认为椭圆度是由输出光束存在的像差引起的,即由光纤端面输出的光束与光轴存在的微小角度偏差都会导致其横向剖面椭圆度降低。同时,在实验过程中发现随着输出功率的增加,光束中心的强度会呈现轻微增大的趋势,当输出功率大于 20 W 时,中心强度不再严格等于 0。这可能是由于放大器中产生了 ASE,以及高泵浦功率条件下残留的  $LP_{01}$  模式得到了放大,这些都会造成径向偏振光纯度的降低。

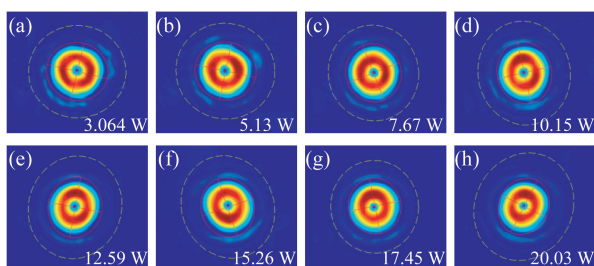


图 6 测量不同输出功率下径向偏振光束的强度分布  
Fig. 6 Measured intensity profiles of radially polarized beam at different output powers

## 4.2 LCP 径向偏振光纯度检测

实验发现,径向偏振光束的椭圆度随输出功率的升高会有所下降,原因应是其模式纯度发生了变化,现采用 PBS(偏振分光棱镜)测量法对其偏振特性进行描述<sup>[25]</sup>。径向偏振光可等效为无数线偏光的叠加,因此在经过 PBS 时,将分为两束偏振态互相垂直的水平偏振光(P 光)和垂直偏振光(S 光),而两束光的占比将直接受到模式纯度的影响。实验装置如图 7 所示(彩图见期刊电

子版),深红色方框即代表基于 LCP 涡旋波片的径向偏振 MOPA 激光器系统,在涡旋波片之后加入并旋转 PBS,通过 CCD 相机和功率计采集不同角度、不同位置处的强度分布和功率。绿色方框为光强分布采集模块,紫色方框为功率采集模块,探测结果见图 8。

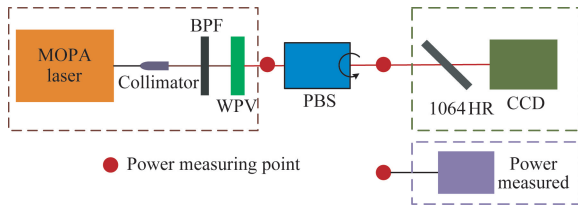


图 7 PBS 法测量径向偏振光模式纯度的实验装置

Fig. 7 Experimental setup for measuring mode purity of radially polarized beam by PBS method

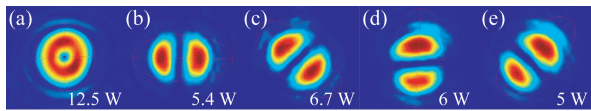


图 8 不同偏振情况下的光强分布。(a) 径向偏振总光强分布;(b)~(e) 径向偏振光经过 PBS 之后水平、左旋 45°、垂直、右旋 45° 方向偏振光光强分布及其对应功率(测试条件:径向偏振光的平均输出功率为 15 W)

Fig. 8 Beam intensity distribution under different polarization states after PBS. (a) Total intensity distribution of radially polarized light; (b)~(e) Horizontal, left 45°, vertical and right 45° polarized light intensity distribution and its corresponding power after passing through PBS (test condition: the average output power of radial polarized light of 15 W)

从数值可知,4 个不同偏振方向光强分布差异性较小。此时,可定量地描述径向偏振光纯度为:

$$POL = 1 - \frac{\left| W_n - \frac{W}{2} \right|}{\frac{W}{2}} \times 100\%, n = 1, 2, 3, 4, \quad (7)$$

其中:  $W$  是总功率,  $W_n$  分别对应于图 8(b)~8(e) 不同偏振方向。将各功率值带入式(7)得到 4 种情况下偏振光的纯度分别为 86.4%, 92.8%, 96%, 80%, 求其平均值为 88.5%。纯度上的差

异说明该系统输出的径向偏振光中混杂着未被 LCP 涡旋波片转换的线偏振信号光,考虑到空间型 LCP 涡旋半波片的模式转换效率无法达到 100%,再加上实验过程中各种误差的引入,所以这种情况是不可避免的。

同时,出于工业加工对系统稳定性的要求,这里对模式纯度进行了重复测试,结果如图 9 所示。60 min 之内径向偏振输出的模式纯度稳定性可达 3% 以内。

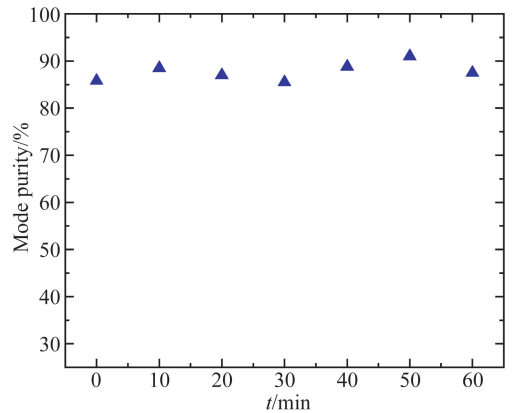


图 9 60 min 模式纯度测试

Fig. 9 Mode purity test within 60 min

## 5 结 论

本文通过搭建一个全光纤保偏 MOPA 结构 YDF 激光器系统,获得了平均输出功率在 20 W 以上、窄线宽(测量值约为 15 kHz)的纳秒脉冲序列。该线偏振高斯光束是利用空间相位转换法获得径向偏振光的理想光源,选用 LCP 涡旋半波片作为空间模式转换器,最终获得了平均功率可达 19.5 W、横向剖面呈规则的空心环形、模式纯度约为 88.5% 的径向偏振涡旋光束稳定输出,实现了由光纤激光器产生径向偏振光,兼具高功率与高转换效率(高纯度)的优势。基于实验中的问题,我们通过提高激光器系统的偏振消光比和优化空间光路设计来提高径向偏振光束的模式纯度,同时利用光纤耦合<sup>[26]</sup>对径向偏振光功率进一步放大。这样一个高输出功率、窄线宽和高纯度的 CVBs 源,在高通量材料加工和超分辨率成像中具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] YOUNGWORTH K S, BROWN T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams [J]. *Optics Express*, 2000, 7(2): 77-87.
- [2] 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.
- [3] CHENG A, GONÇALVES J T, GOLSHANI P, *et al.*. Simultaneous two-photon calcium imaging at different depths with spatiotemporal multiplexing [J]. *Nature Methods*, 2011, 8(2): 139-142.
- [4] NOVOTNY L, BEVERSLUIS M R, YOUNGWORTH K S, *et al.*. Longitudinal field modes probed by single molecules [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(23): 5251-5254.
- [5] 唐碧华, 郑尚彬, 张勇, 等. 高斯涡旋光束通过像散透镜后的相位奇异特性 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 303-309.
- TANG B H, ZHENG S B, ZHANG Y, *et al.*. Phase singularities of Gaussian vortex beams through an astigmatic lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 303-309. (in Chinese)
- [6] 王思聪, 李向平. 紧聚焦轴对称矢量光场波前调控及应用 [J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 185-202.
- WANG S C, LI X P. Wavefront manipulation of tightly focused cylindrical vector beams and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 185-202. (in Chinese)
- [7] WEBER R, MICHALOWSKI A, ABDOU-AHMED M, *et al.*. Effects of radial and tangential polarization in laser material processing [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 21-30.
- [8] KRAUS M, AHMED M A, MICHALOWSKI A, *et al.*. Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization [J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 22305-22313.
- [9] CHEN W B, ZHAN Q W. Three-dimensional focus shaping with cylindrical vector beams [J]. *Optics Communications*, 2006, 265(2): 411-417.
- [10] MOSHE I, JACKEL S, MEIR A. Production of radially or azimuthally polarized beams in solid-state lasers and the elimination of thermally induced birefringence effects [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(10): 807-809.
- [11] TIDWELL S C, FORD D H, KIMURA W D. Generating radially polarized beams interferometrically [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(15): 2234-2239.
- [12] BERESNA M, GECEVICIUS M, KAZANSKY P G. Polarization sensitive elements fabricated by femtosecond laser nanostructuring of glass [Invited] [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(4): 783-795.
- [13] AHMED M A, SCHULZ J, VOSS A, *et al.*. Radially polarized 3 kW beam from a CO<sub>2</sub> laser with an intracavity resonant grating mirror [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1824-1826.
- [14] MOSHE I, JACKEL S, MEIR A, *et al.*. 2 kW,  $M^2 < 10$  radially polarized beams from aberration-compensated rod-based Nd: YAG lasers [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(1): 47-49.
- [15] LOESCHER A, NEGEL J, GRAF T, *et al.*. Radially polarized emission with 635 W of average power and 2.1 mJ of pulse energy generated by an ultrafast thin-disk multipass amplifier [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5758-5761.
- [16] PIEHLER S, DELEN X, RUMPEL M, *et al.*. Amplification of cylindrically polarized laser beams in single crystal fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 11376-11381.
- [17] 邹吉跃, 刘学胜, 徐爱东, 等. 大信号无水冷 LD 侧泵 Nd: YAG 激光放大器 [J]. *发光学报*, 2019, 40(7): 885-890.
- ZOU J Y, LIU X SH, XU A D, *et al.*. Large signal LD side-pumped Nd: YAG laser amplifier without water-cooler [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(7): 885-890. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] LIN D, BAKTASH N, ALAM S, *et al.*. 106 W, picosecond Yb-doped fiber MOPA system with a radially polarized output beam [J]. *Optics Letters*,

2018, 43(20): 4957-4960.

- [21] 李浩然, 樊承锦, 党锦超, 等. 高次方涡旋光束经大数值孔径透镜的聚焦特性 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(1): 17-21.  
LI H R, FAN CH J, DANG J CH, *et al.*. Focusing properties of power-exponent-phase vortex beam focused by high numerical-aperture objective [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(1): 17-21. (in Chinese)
- [22] 赵小丽, 张钰民, 庄炜, 等. 级联光栅结合 Sagnac 环的可调谐光纤激光器 [J]. 发光学报, 2019, 40(3): 357-365.  
ZHAO X L, ZHANG Y M, ZHUANG W, *et al.*. Tunable fiber laser based on cascaded grating combing with Sagnac loop [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(3): 357-365. (in Chinese)
- [23] 曹康, 秦文斌, 葛廷武, 等. 全光纤调 Q 激光器腔内脉宽压缩技术 [J]. 发光学报, 2018, 39(6): 802-808.  
CAO K, QIN W B, GE T W, *et al.*. Internal pulse width compression technology of all-fiber Q-switched laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(6): 802-808. (in Chinese)
- [24] ZHANG B M, FENG Y J, LIN D, *et al.*. Demonstration of arbitrary temporal shaping of picosecond pulses in a radially polarized Yb-fiber MOPA with > 10 W average power [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15402-15413.
- [25] 彭红攀, 杨策, 卢尚, 等. 径向偏振光纯度检测及偏振态分布特性评价 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 105-109.  
PENG H P, YANG C, LU SH, *et al.*. Radially polarized beam purity detection and evaluation of polarization distribution characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 105-109. (in Chinese)
- [26] 刘翠翠, 王鑫, 井红旗, 等. 三波长合束单管激光器光纤耦合模块设计 [J]. 发光学报, 2018, 39(3): 337-342.  
LIU C C, WANG X, JING H Q, *et al.*. Design of fiber-coupled laser diode module based on three-wavelengths multiplexing by ZEMAX [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(3): 337-342. (in Chinese)

#### 作者简介:



贾文增(1995—),男,山东德州人,硕士研究生,2018年于山东大学获得学士学位,主要从事高功率光纤激光器及径向偏振光方面的研究。E-mail: wenzengjia@emails.bjut.edu.cn

#### 通讯作者:



刘学胜(1980—),男,北京人,博士,助理研究员,2009年于北京工业大学获得博士学位,主要从事大功率脉冲光纤激光器及其应用方面的工作。E-mail: liuxuesheng@bjut.edu.cn

#### 导师简介:



王智勇(1970—),男,重庆人,研究员,博士生导师,1992年于北京理工大学获得学士学位,1995年、1998年于北京工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事大功率半导体激光器,大功率半导体激光关键器件制备与集成,大功率光纤激光器方面的研究工作。E-mail: zywang@bjut.edu.cn