



·强激光物理与技术·

集成超表面模式转换的全光纤柱矢量 MOPA 激光器*

刘世鑫^{1,2}, 彭万敬², 冯昱俊², 刘 航², 施鑫磊², 孙殷宏²,
马 毅², 赵智刚¹, 高清松², 刘兆军¹, 唐 淳²

(1. 山东大学 激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 柱矢量光束因其独特的偏振分布特性而在光镊、高分辨率成像、遥感、等离子体聚焦等领域发挥着重要作用。为实现全光纤高功率柱矢量 MOPA 激光器, 采用自主设计基于集成超表面的模式转换光纤器件, 进行了理论分析与实验验证。自主设计集成超表面的模式转换光纤器件可直接稳定输出数瓦功率的径向偏振柱矢量种子光, 且输出模式纯度可达 95% 以上。实验中通过降低弯曲损耗并对模式进行控制, 获得了单级放大输出功率为 52.2 W 的径向偏振柱矢量光稳定输出, 且模式光场分布在输出功率增加过程中并未出现明显变化。为进一步分析输出的模式特性, 采用旋转检偏器的方法检测输出光的偏振特性及偏振纯度, 并利用非相干模式叠加方法计算了输出的径向偏振柱矢量光的模式纯度。结果表明, 集成超表面模式转换的全光纤柱矢量 MOPA 激光器在最大输出功率情况下, 输出光的偏振纯度约为 95.2%, 模式纯度约为 94%, 验证了该全光纤方案的可行性。

关键词: 超表面; 柱矢量光束; 径向偏振光; 光纤激光器; 模式分析; 弯曲损耗

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230166

All-fiber cylindrical vector beam MOPA laser based on integrated metasurface mode convertor

Liu Shixin^{1,2}, Peng Wanjing², Feng Yujun², Liu Hang², Shi Xinlei², Sun Yinzhong²,
Ma Yi², Zhao Zhigang¹, Gao Qingsong², Liu Zhaojun¹, Tang Chun²

(1. Key Laboratory of Laser & Infrared System, Ministry of Education, Shandong University, Qingdao 266237, China;

2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Driven by the unique polarization distribution characteristics, cylindrical vector beams play an important role in optical tweezers, high resolution imaging, remote sensing, plasma focusing, and other related fields. To realize all-fiber high-power cylindrical vector beams MOPA laser, a mode conversion fiber device based on integrated metasurface is independently designed, whose feasibility is analyzed and verified in this demonstration. The self-designed integrated metasurface mode conversion fiber device can act as a radially polarized vector beam seed with several watts, and the mode purity is more than 95%. In the experiment, a radially polarized vector beam with an output power of 52.2 W was achieved in the case of a single-stage amplifier by decreasing bending loss and controlling the mode. Moreover, the mode field distribution was maintained well during the amplification. To further analyze the obtained mode characteristics, a rotatable polarizer method was used to measure the polarization characteristics and polarization purity, and the mode purity was measured by an incoherent mode superposition method. The results show that the polarization purity of the radially polarized vector beam is approximately 95.2% and the mode purity is about 94% with the maximum output power, which verify the feasibility of the all-fiber scheme.

Key words: metasurface, cylindrical vector beam, radially polarized beam, fiber laser, mode analysis, bend loss

柱矢量光束是一种具有中心轴对称偏振分布的圆环形光束^[1]。其中, 径向偏振柱矢量光经过高数值孔径透镜聚焦后, 会形成超衍射极限的焦斑并产生极强的纵波场。这一独特的聚焦特性使得其在光镊^[2]、遥感^[3]、激光加工^[4]

* 收稿日期: 2023-06-02; 修订日期: 2023-08-22

联系方式: 刘世鑫, 15615834335@163.com。

通信作者: 彭万敬, wanjing.p@163.com。

等领域受到广泛关注。光纤激光器因具有优异的光束质量、良好的散热性能和柔性传输等特点而被广泛研究和应用。因此,研究高功率单一柱矢量光纤激光器十分重要。

目前,全光纤柱矢量激光器还处于相对较低的功率水平,其中大部分会应用到光纤错位熔接技术^[5]、长周期少模光纤光栅^[6]、模式选择耦合器^[7]等。2012年,孙彪等^[8]利用光纤错位熔接技术实现了低阈值全光纤柱矢量光纤激光器,并通过少模光纤光栅提高了输出模式的偏振纯度,最终输出的径向偏振和角向偏振柱矢量光的偏振纯度均大于94%,功率仅为几个mW。2017年,张娇娇等^[9]通过少模光纤光栅对与光纤错位熔接技术实现了75mW的柱矢量光输出,模式纯度大于95.5%。2018年,汪杰等^[10]利用模式选择耦合器实现了mW量级输出的柱矢量光纤激光器,径向偏振和角向偏振柱矢量光的偏振纯度分别为96.6%和96.3%。2020年,张一民等^[11]通过自己研制的1 μm 波段的双矢量模耦合长周期光纤光栅,并结合偏振控制实现了大于50mW的径向偏振和角向偏振柱矢量光的稳定输出,模式纯度分别为97.3%和92.4%。2022年,刘相中等^[12]通过模式叠加原理,将保偏长周期光栅耦合生成的 LP_{11a}^y 分成两路,其中一路将从 LP_{11a}^y 转换成 LP_{11b}^x ,然后经过偏振分束器(PBS)将两路光合成角向偏振柱矢量光束。合成后的输出功率为3.1W、模式纯度为91.2%,实现了瓦级全保偏结构的高功率柱矢量光纤激光器。然而,受限于少模光纤器件与柱矢量光在弱导光纤中的高度简并性,使得柱矢量光在光纤中的稳定传输与功率放大仍然是一个待解决的问题,尤其是对柱矢量光的功率放大,由于其独特的空心光场分布特性,基模易导致其在功率放大过程中模式纯度迅速衰减从而影响放大后柱矢量光的特性。

为解决上述问题并实现高功率全光纤的柱矢量激光器,本文主要通过自主设计的基于集成超表面的模式转换光纤器件提供高功率、高模式纯度、高偏振纯度的单一柱矢量种子光,然后利用少模光纤放大器对注入的种子光进行功率放大。其中少模光纤放大器中的光纤合束器采用信号入射光纤与信号输出光纤非拉锥工艺制作而成,实现单一柱矢量光的无损耗、无模式耦合传输。光纤的盘绕结合弯曲损耗分析与模式控制,并摆放在自主设计的少模光纤放大器水冷板上以实现良好的散热。与此同时,各光纤的熔接点均经过精密熔接避免引入附加损耗和其它干扰模式。通过这些优化设计,本文实现了输出功率为52.2W、偏振纯度约为95.2%、模式纯度约为94%的单一柱矢量全光纤主振荡功率放大器(MOPA)。

1 理论分析

实验中所用的光纤参数见表1。为求得此光纤中可传导的矢量模式,通过有限元模式分析方法对光纤特征方程进行严格的矢量求解,得到可传导的矢量模式的光场分布如图1所示,白色箭头为偏振方向。根据计算结果可认为此光纤中支持6个矢量模式的有效传导,分别为基模(HE_{11}^x 和 HE_{11}^y)和柱矢量模(TM_{01} 、 HE_{21}^e 、 HE_{21}^o 和 TE_{01})。根据模式耦合理论可知,当可传导模式间的有效模式折射率差大于 10^{-4} 量级时,各个模式可以在光纤中很好地独立传输。然而, TM_{01} (径向偏振光)、 HE_{21}^e 、 HE_{21}^o 和 TE_{01} (角向偏振光)之间的有效模式折射率在 10^{-7} 量级,这就意味着对光纤的盘绕设计需要以减小模式之间的耦合为参考^[13]。

表 1 光纤参数

Table 1 Fiber parameters

fiber core diameter/ μm	cladding diameter/ μm	cladding refractive index	numerical aperture	normalized frequency	laser wavelength/nm
20	400	1.45	0.064	3.78	1064

在光纤激光器中,经常用较小的光纤弯曲半径来抑制高阶模以获得高纯度的基模激光输出。因此,在高阶模光纤激光器中,光纤的弯曲半径将大于基模输出的光纤激光器。通过数值计算方法,可以得到适合柱矢量模的光纤弯曲半径范围。根据文献[14]可知,光纤中的高阶模式弯曲损耗可定义为

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{\pi\gamma R}} \frac{r\kappa^2}{f^2} \exp\left(2\gamma r - \frac{2\gamma^3}{3\beta^2} R\right) \quad (1)$$

式中: $\kappa = \sqrt{(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)}$; $\gamma = \sqrt{(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)}$; $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$; r 为光纤纤芯半径; R 为光纤弯曲半径; f 为归一化频率; β 为传播常数;

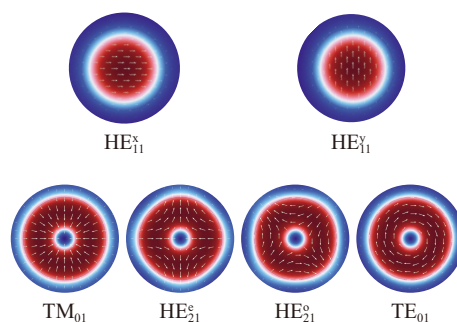


Fig. 1 Beam intensity distribution of the supposed mode in the fiber

图 1 光纤中所支持模式的光强分布

λ 为激光波长; n_1 、 n_2 分别为光纤纤芯、包层折射率。将表1中的光纤参数及通过有限元求解的柱矢量模传播常数代入公式(1)中, 结果如图2所示, 由图2可知, 光纤的弯曲半径应大于15 cm, 此时光纤弯曲所带来的损耗可以忽略不计。值得注意的是, 光纤弯曲不仅会引入弯曲损耗, 还会引发光纤中原有应力双折射的变化, 这样会导致模间耦合的发生及柱矢量模在光纤中偏振分布特性的变化。因此, 为实现单一柱矢量模在光纤中的良好传输及功率放大, 需要避免光纤弯曲对柱矢量模的损耗和对偏振分布特性的影响。

2 实验

全光纤柱矢量 MOPA 激光器的结构如图3所示。振荡器为1064 nm 光纤激光器, 输出光纤纤芯/包层直径为10/125 μm 。自主设计基于集成超表面的模式转换光纤器件中的超表面结构是由飞秒激光在石英玻璃上刻蚀纳米结构而成, 利用此纳米结构对光的有效双折射效应而改变光的偏振态, 是一种光轴沿空间分布的相位延迟板, 其原理可用琼斯矩阵表示为

$$M = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: φ 为极角, 纳米结构以 $\frac{1}{2}\varphi$ 角度形成连续可变的光轴。当一束偏振方向平行于超表面主光轴的线偏振光通过此结构后, 经过偏振转换变化的光束可用琼斯矩阵表示为

$$M = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可知, 经过转换后的线偏振光变成了径向偏振光。该模式转换器件的输入端光纤与振荡器输出光纤参数一致, 输出端光纤纤芯/包层直径为20/400 μm 。少模光纤放大器中的半导体泵浦源中心波长为975 nm, 最大泵浦功率为89 W, 由非拉锥工艺制作的光纤泵浦合束器将泵浦光耦合进增益光纤。增益光纤使用大模场双包层掺镱光纤, 光纤纤芯/包层直径为20/400 μm 、纤芯数值孔径为0.064、吸收系数为1.2 dB/m@975 nm、光纤长度约为11 m。采用包层功率剥除器(CPS)对未完全吸收的泵浦光进行剥除, 输出端光纤以8°角斜切来避免菲涅尔反射。除振荡器外, 激光器整体结构中使用的光纤弯曲半径大于15 cm且无任何异常弯折及扭转, 从而减小光纤弯曲对径向偏振柱矢量光功率与模式特性的影响。

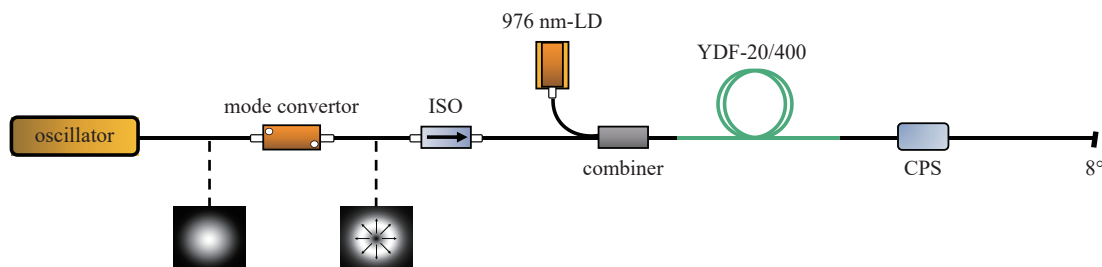


Fig. 3 All fiber cylindrical vector beam MOPA laser system

图3 全光纤柱矢量 MOPA 激光器结构

实验中, 振荡器输出的基模经模式转换光纤器件后获得0.85 W的径向偏振柱矢量光, 此时输出的环形光斑强度分布与通过可旋转检偏器后的光斑强度分布可通过CCD观察, 结果如图4所示, 由图4可以看出, 当径向偏振光分别经过通光轴为0°、45°、90°和135°的检偏器时, 原本环形的光斑被分成了两瓣, 且两瓣的排列方向与检偏器的通光轴方向一致, 这一结果证明了输出的环形光斑为径向偏振柱矢量光。而且, 经过检偏器后被很好分开的两个瓣也代表着输出模式的高纯度。通过文献[15]和文献[16]所述方法可知, 计算输出径向偏振柱矢量光的偏振纯

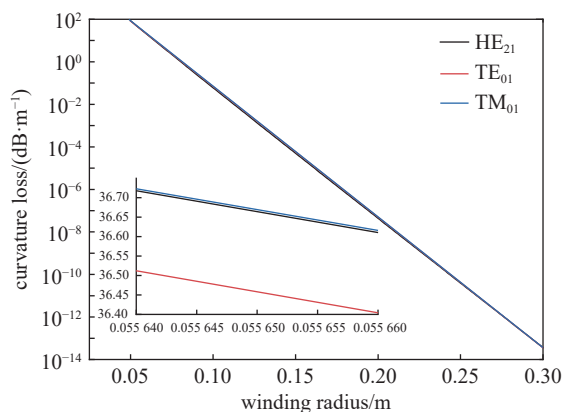


Fig. 2 Curvature loss of cylindrical vector beam as a function of winding radius

图2 柱矢量弯曲损耗随弯曲半径的变化

度(P_e)和模式纯度(P_m)可近似表示为

$$P_e = 10 \lg \left(\frac{P_p}{P_s} \right) \quad (4)$$

$$P_m = \frac{m}{m+n} \times 100\% \quad (5)$$

式中: P_p 、 P_s 分别为 p 方向和 s 方向的线偏振光功率; m 、 n 分别为径向偏振光(TM_{01})和基模(LP_{01})非相干叠加拟合后的占比。输出径向偏振柱矢量光的偏振通过小孔截取输出光斑中的一部分进行近似测量得到(所截取的光斑偏振态可近似认为是线偏振),而模式纯度则是通过输出光斑的一维强度分布曲线进行非相干叠加的拟合计算得到。因此,可知获得的径向偏振柱矢量光的偏振纯度为 96.4%、模式纯度为 95.8%。

为获得高功率激光输出,将其注入到少模光纤放大器中进行功率放大,图 5 为放大后的输出功率随泵浦功率的变化关系。由图 5 可知,输出激光功率随泵浦功率呈线性增加,在最大泵浦功率下获得 52.2 W 的最大输出激光功率,对应的激光放大器的斜效率约为 58.7%。测得通过可旋转检偏器前后最大输出功率的光斑强度分布如图 6 所示,利用上文提到的方法,计算得到此时输出的径向偏振柱矢量光的偏振纯度为 95.2%、模式纯度为 94%。

为进一步分析输出径向偏振柱矢量光的偏振纯度在功率放大过程中的变化,利用上面所提到的方法检测其偏振纯度,结果如图 7 所示,由图 7(b)可以看出,随着输出功率的增大,径向偏振柱矢量光的偏振纯度并不会保持不变,但在功率放大过程中偏振纯度可保持在 95% 以上。引起径向偏振柱矢量光偏振纯度变化的原因主要包括功率放大过程中光纤的热致双折射和外界对光纤的扰动等。对于这些干扰的定量分析比较困难,但可以通过外部的主动控制进行一定的调节,弥补其光纤内部及外部受到的影响,从而提高系统输出径向偏振柱矢量光的偏振纯度。综上所述,经过放大后的径向偏振柱矢量光仍能保持其偏振分布特性,证明了该实验方案的可行性。



Fig. 4 Beam intensity distribution before and after passing through a rotatable polarizer

图 4 通过检偏器前后的光场强度分布

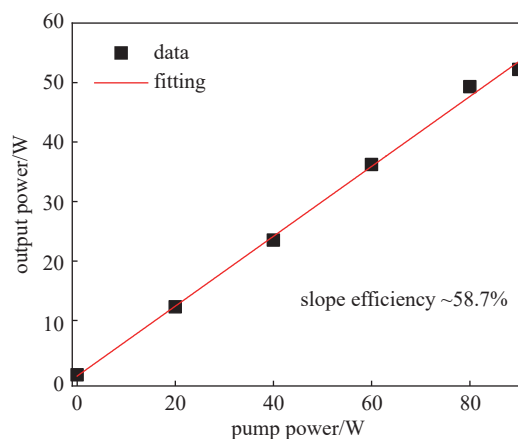


Fig. 5 Output power versus pump power

图 5 输出功率随泵浦功率的变化图

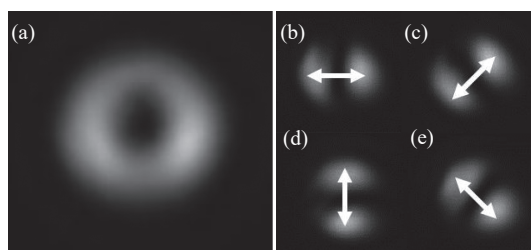
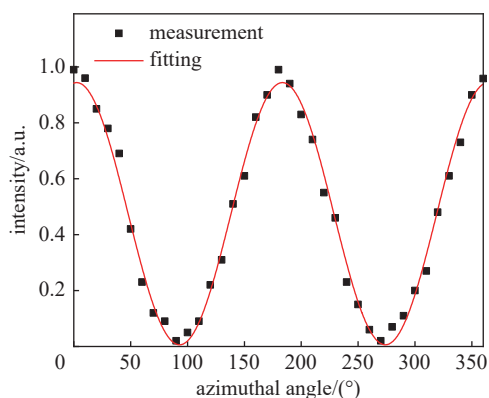
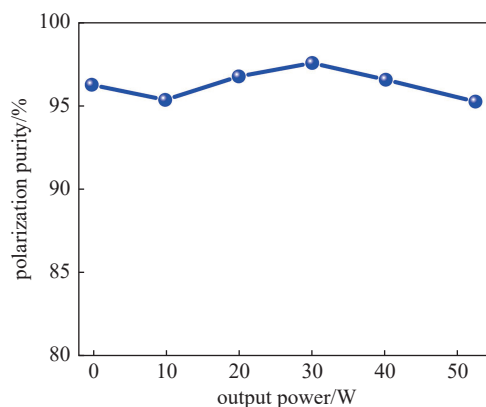


Fig. 6 Beam intensity distribution with the maximum output power before and after passing through a rotatable polarizer

图 6 通过检偏器前后的光场强度分布



(a) intensity variation after passing through a polarizer (at 52.2 W)



(b) polarization purity during amplification

Fig. 7 Polarization purity versus degree of the polarizer analyzer at 52.2 W and variation of polarization purity during amplification

图 7 最高输出功率下输出强度随检偏器角度的变化和偏振纯度在放大过程中的变化

3 结 论

本文通过利用自主设计的集成超表面的模式转换光纤器件实现了光纤中基模到柱矢量模的转换, 获得了偏振纯度为 96.4%、模式纯度为 95.8% 的 0.85 W 单一径向偏振柱矢量光输出。通过 MOPA 结构的少模光纤放大器将单一径向偏振柱矢量种子光进行功率放大, 在最大泵浦功率下获得了激光输出功率为 52.2 W、偏振度为 95.2%、模式纯度为 94% 的径向偏振光。由于经过超表面结构产生的径向偏振光被耦合进少模光纤中, 因此输出激光的光束质量将会提升。此外, 本文采用了 MOPA 结构对径向偏振光进行功率放大, 避免了利用超表面结构直接生成高功率径向偏振光过程中的插入损耗, 这将提升激光器的整体效率。同时, 该实验结果证明了基于集成超表面的模式转换光纤器件的高功率单一柱矢量模 MOPA 激光器全光纤化的可行性, 为实现高功率全光纤柱矢量激光器提供了参考方案。

参考文献:

- [1] 崔祥霞, 陈君, 杨兆华. 径向偏振光研究的最新进展[J]. *激光杂志*, 2009, 30(2): 7-10. (Cui Xiangxia, Chen Jun, Yang Zhaohua. Research progress on radially polarized beam[J]. *Laser Journal*, 2009, 30(2): 7-10)
- [2] Roy S, Ushakova K, Van Den Berg Q, et al. Radially polarized light for detection and nanolocalization of dielectric particles on a planar substrate[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114: 103903.
- [3] Zhang Chonglei, Wang Rong, Min Changjun, et al. Experimental approach to the microscopic phase-sensitive surface plasmon resonance biosensor[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102: 011114.
- [4] Youngworth K S, Brown T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Optics Express*, 2000, 7(2): 77-87.
- [5] 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.
- [6] Guo Yancheng, Liu Yange, Wang Zhi, et al. All-fiber mode-locked cylindrical vector beam laser using broadband long period grating[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15: 085108.
- [7] Song Huaqing, Zhao Zhongxiang, Xian Lunlun, et al. A wavelength-tunable narrow-linewidth all-fiber laser with cylindrical vector beam outputs[J]. *Optics Communications*, 2018, 428: 245-250.
- [8] Sun Biao, Wang Anting, Xu Lixin, 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.
- [9] Zhang Jiaojiao, Wan Hongdan, Zhang Lin, et al. All-fiber CW cylindrical vector beam fiber laser based on few-mode fiber Bragg grating[J]. *Optik*, 2017, 147: 109-114.
- [10] Wang Jie, Wan Hongdan, Cao Han, 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.
- [11] Zhang Yimin, Tao Runxia, Li Hongxun, et al. Stable generation of cylindrical vector beams with an all-fiber laser using polarization-maintaining and ring-core fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18351-18359.
- [12] Liu Xiangzhong, Zhang Yimin, Dong Zhipeng, et al. High-power cylindrical vector beam fiber laser based on an all-polarization-maintaining structure[J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 27123-27131.
- [13] Zhang B M, Feng Yujun, Lin Di, 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.
- [14] Marcuse D. Bend loss of slab and fiber modes computed with diffraction theory[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(12): 2957-2961.
- [15] Lin Di, Xia Kegui, Li Jianlang, et al. Efficient, high-power, and radially polarized fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2290-2292.
- [16] Lin Di, Daniel J M O, Gecevičius M, et al. Cladding-pumped ytterbium-doped fiber laser with radially polarized output[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(18): 5359-5361.