引用格式：WANG Cheng-xin，LU Bao-le，LUO Min，*et al*. Passive Q-switched Cylindrical Vector Beam Fiber Laser Based on Few Mode Fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*，2020，**49**(3)：0314003
王承鑫，陆宝乐，罗敏，等. 基于少模光纤被动调 Q 柱矢量光光纤激光器[J].光子学报，2020，**49**(3)：0314003

基于少模光纤被动调 Q 柱矢量光光纤激光器

王承鑫[1,2,3]，陆宝乐[1,2,3]，罗敏[4]，陈浩伟[1,2,3]，白晋涛[1,2,3]
（1 西部能源光子技术及功能材料省部共建国家重点实验室，西安 710069）
（2 国家级光电技术与纳米功能材料国际联合研究中心，西安 710069）
（3 西北大学 光子学与光子技术研究所；陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心；
陕西省光电子技术重点实验室，西安 710069）
（4 西安应用光学研究所，西安 710065）

摘　要：通过单模光纤和少模光纤熔融拉锥耦合的方法制备出模式转换器，而后将一层多壁的碳纳米管薄膜作为可饱和吸收体覆盖到拉锥光纤的锥区，形成一种可饱和吸收体柱矢量光器件.结合调 Q 光纤激光器和模式转换器件的优势，可以简单高效地产生脉冲柱矢量光束，并得到具有峰值功率高、模式纯度高等特点的脉冲高阶模式激光输出.通过实验实现了中心波长为 1 560 nm、最大单脉冲能量和最大峰值功率分别为 116 nJ 和 57 mW 的稳定调 Q 脉冲输出.通过调节光路中的偏振控制器，可以分别实现径向和角向偏振的调 Q 脉冲激光的输出.

关键词：光纤激光器；被动调 Q；碳纳米管；可饱和吸收体；柱矢量光
中图分类号：TN248.1　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/gzxb20204903.0314003

Passive Q-switched Cylindrical Vector Beam Fiber Laser Based on Few Mode Fiber

WANG Cheng-xin[1,2,3], LU Bao-le[1,2,3], LUO Min[4], CHEN Hao-wei[1,2,3], BAI Jin-tao[1,2,3]
(1 *National Key Laboratory of Western Energy Photoelectric Technology and Functional Materials*, *Xi'an* 710069, *China*)
(2 *National Optical Technology and Functional Nanomaterials International Science and Technology Joint Research Center*, *Xi'an* 710069, *China*)
(3 *Institute of Photonics and Photon-technology*, *Northwest University*; *Shaanxi Engineering Technology Research Center for Solid State Lasers and Application*; *Provincial Key Laboratory of Photo-electronic Technology*, *Xi'an* 710069, *China*)
(4 *Xi'an Institute of Applied Optics*, *Xi'an* 710065, *China*)

Abstract: A mode converter is prepared through fusion taper coupling a single mode fiber and a few mode fiber, and then a multi-walled carbon nanotube film is used as a saturable absorber to cover the cone of the converter to form a saturable absorber cylindrical vector optical device. Combined the advantages of Q-switched fiber laser and mode conversion device, the pulse cylindrical vector beam can be generated simply and efficiently, and a pulsed high-order mode laser output with high peak power and high mode purity can be obtained. The experiment successfully achieves a stable Q-switched pulse output with a center wavelength of 1 560 nm, a maximum single pulse energy and a maximum peak power of 116 nJ and 57 mW, respectively. The output of the Q-switched laser with radially and azimuthally polarized

基金项目：国家重点研发计划(No. 2017YFB0405102)，陕西省教育厅重点实验室项目(No. 18JS113)
第一作者：王承鑫(1995－)，男，硕士研究生，主要研究方向为超短脉冲光纤激光器. Email：704854436@qq.com
导　　师：白晋涛(1959－)，男，教授，博士，主要研究方向为新型激光技术与器件、非线性光学、纳米功能材料. Email：baijt@nwu.edu.cn
通讯作者：陈浩伟(1978－)男，副研究员，博士，主要研究方向为高功率全固态激光器及新型光纤激光器方面的研究. Email：67892020@qq.com
收稿日期：2019-11-28；**录用日期**：2019-12-23

beams can be achieved by adjusting the polarization controller in the optical path.

Key words: Fiber laser; Passive Q-switched; Carbon nanotubes; Saturable absorber; Cylindrical vector beam

OCIS Codes: 140.3540; 140.3510; 140.3538; 260.1960

0 引言

柱矢量光束是指偏振态轴对称分布、同一时刻同一波阵面上的不同位置具有不同偏振态的光束，包括径向偏振光、角向偏振光和混合态偏振光[1-3].柱矢量光束的偏振态在空间非均匀分布的性质产生许多新颖的现象，以径向偏振光为例，其通过高数值孔径透镜紧聚焦后，在平行光轴方向的纵向分量会叠加，产生一个高度聚焦的焦点[4].这种性质使得柱矢量光束在表面等离子聚焦[5]、粒子操控[6]、激光加工[7]等领域有着广泛的应用前景.柱矢量光束自从第一次发现以来[8-9]，就引起了研究者们的浓厚兴趣，各种生成柱矢量光束的方法被陆续提出.目前柱矢量光的生成方法主要分为主动法和被动法两种，主动法指的是在激光谐振腔内引入具有选模作用的特殊光学元件(如二向色性元件[10]、偏振选择镜[11]等)滤掉其他偏振模式，使激光器直接输出柱矢量光；被动法是在谐振腔外利用少模光纤[12]、相位板[13]等特殊光学元件通过偏振变换得到柱矢量光束.

在普通阶跃光纤的本征解中，LP_{11}模式包含的四个简并模：TE_{01}模式、TM_{01}模式以及$HE_{21e/o}$模式，分别对应径向、角向和混合态偏振光.因此，利用少模光纤将光波从基模LP_{01}模激发到高阶简并模LP_{11}模上，再利用一系列的偏振控制器件对它的不同模式进行选择性输出，即可实现径向偏振和角向偏振的选择性输出[14].2006年，GROSJEAN T等通过将单模光纤和少模光纤横向错位耦合，获得了径向和角向偏振光，但是这种方法的耦合效率较低[15].2014年，ISMAEEL R等通过融合预锥形的单模光纤(Single Mode Fiber，SMF)和少模光纤(Few Mode Fiber，FMF)形成光纤耦合器[16]，在100 nm光谱范围内所有高阶模式的耦合效率超过90%，而插入损耗保持低至0.5 dB.2018年，中国科学技术大学的陈瑞山等利用长周期少模光纤光栅来激发激光的高阶模式，产生了斜率效率为35.41%的24.5 mW的低阈值径向和角向偏振光，但是由于非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation，NPR)结构的原因，其锁模需要在特定的偏振状态才能保持[17].目前为止，大部分的柱矢量光束都是以连续光的形式输出，鲜有脉冲输出的柱矢量光的报道，而全光纤柱矢量光产生脉冲输出的更加少见.

本文结合光纤拉锥耦合的优势，采用少模光纤与单模光纤拉锥耦合的方法，通过控制拉锥光纤的纤芯半径，实现了LP_{01}和LP_{11}两种光模式在不同光纤中的相位匹配，从而激发特定模式的光场，获得模式纯度高达92%的柱矢量光束.这种全光纤集成器件结构的设计提高了激光器的集成度，减小了激光器的体积，使得这种激光器在光学操纵和粒子捕获中具有广泛的潜在应用.

1 耦合器结构设计与材料表征

1.1 模式转换器原理

将单模光纤(紫色，芯/包层直径=6.2 μm/125 μm，NA=0.14)和少模光纤(黄色，芯/包层直径=22.4 μm/125 μm，NA=0.12)分别拉锥至15 μm和20 μm，之后采用弱耦合技术将两根拉锥光纤耦合(耦合区的长度约为3 mm)形成模式转换器，如图1所示，从而实现基模LP_{01}模向高阶模式LP_{11}模的转换[18].

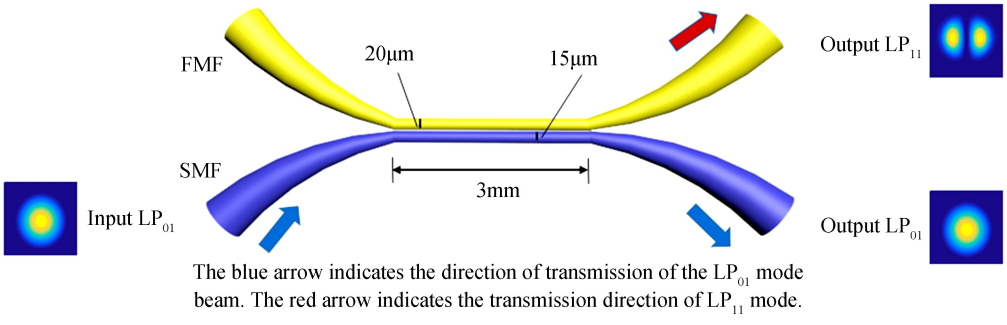


图1 2×2端口的模式转换器的原理

Fig.1 Schematic of the mode selective coupler for 2×2 ports

这种集成 2×2 模式转换器的光场能量耦合分布遵循耦合模方程[19]

$$\frac{\mathrm{d}A_1(z)}{\mathrm{d}z}=\mathrm{i}(\beta_1+C_{11})A_1+\mathrm{i}\,C_{12}A_2 \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}A_2(z)}{\mathrm{d}z}=\mathrm{i}(\beta_2+C_{22})A_2+\mathrm{i}\,C_{21}A_1 \tag{2}$$

式中，z 是沿耦合器的耦合区域的距离；A_1 和 A_2 分别是 SMF 中的 LP_{01} 模式和 FMF 中的 LP_{11} 模式的模态场幅度；β_1 和 β_2 分别是 FMF 中 LP_{11} 模式和 SMF 中 LP_{01} 模式的传播常数；C_{11} 和 C_{22} 表示自耦合系数，C_{12} 和 C_{21} 表示互耦系数，C_{11} 和 C_{22} 相对于 C_{12} 和 C_{21} 可忽略不计，并且 $C_{21}\approx C_{12}\approx C$.利用光纤拉锥的方法改变单模光纤中 LP_{01} 和少模光纤中 LP_{11} 的光传播常数，当 β_1 等于 β_2 时，相位失配等于 0，表明 SMF 中的基模（LP_{01}）和 FMF 中高阶模式的（LP_{11}）满足相位匹配条件.

模式转换器两个端口的激光分光比可由推导耦合模方程得到，即

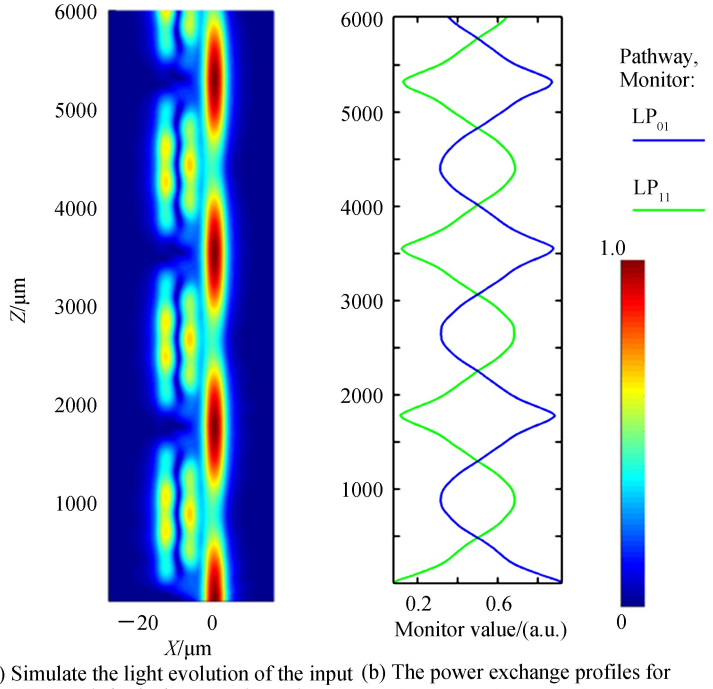
$$P_1=|A_1(z)|2=1-F^2\sin^2\left(\frac{C}{F}z\right) \tag{3}$$

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

$$F=\left[1+\frac{(\beta_1-\beta_2)^2}{4C^2}\right]^{-1/2} \tag{5}$$

式中，P_1 表示输出基模 LP_{01} 光的功率，P_2 表示高阶模式 LP_{11} 的功率，F^2 为光纤之间耦合的最大功率.光在光纤耦合器内传输时能量会在两光纤间发生周期性转移，且当能量第一次从单模光纤完全转移到另一根光纤时所传输的最短距离被称为耦合长度.可以通过控制耦合区的长度来控制模式转换器的两个输出端的分光比.

通过解耦合方程式(1)和(2)，用光束传播方法（Beam Propagation Method，BPM）模拟输出光斑模式演变的过程.波长为 1 550 nm 的基模 LP_{01} 光束从单模光纤的输入端进入模式转换器后（见图 1），在锥区与少模光纤发生了耦合和能量交换，高阶模式 LP_{11} 将被激发，并且能量沿 z 轴在这两种模式之间振荡，如图 2 所示.激发的高阶 LP_{11} 模式从少模光纤输出端输出，未激发的基模光从单模光纤的输出端输出.实验测得制作的模式转换器高阶模式输出端和基模输出端的两个端口的分光比为 1∶19.



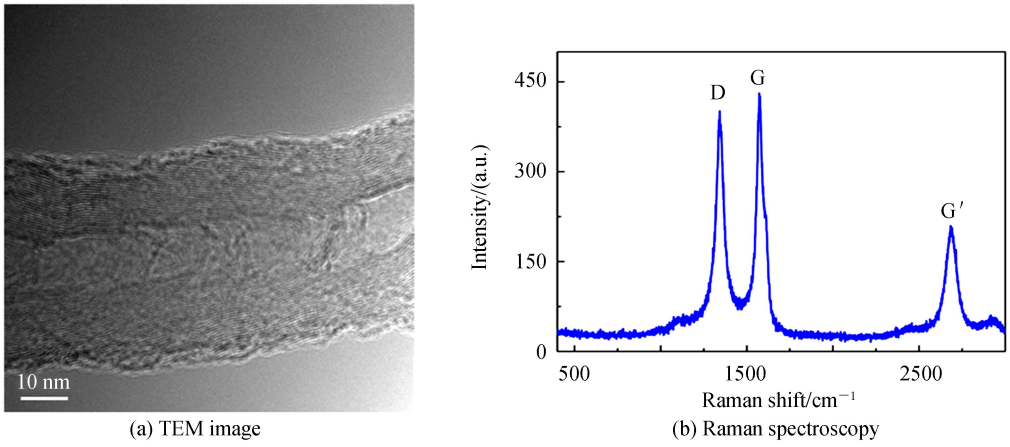
(a) Simulate the light evolution of the input LP_{01} mode in the integrated coupler (b) The power exchange profiles for the LP_{01} and LP_{11} modes

图 2　模式转换器的光场能量耦合模拟

Fig.2　The beam coupling simulation of the mode selective coupler

1.2 材料的制备和表征

实验通过液相剥离法[20]来制备多壁碳纳米管(Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)薄膜,首先将 100 mg 直径为 20～30 nm、长度为 1～2 μm、纯度为 99%的 MWCNT 粉末与 400 mL 浓度为 50%的异丙醇混合.之后将该混合物溶液超声处理 60 min 以获得包含 MWCNT 纳米片的分散液,然后将分散液通过离心机高速离心 30 min 后,取其上清液,即可得到剥离程度较高的 MWCNT 纳米片分散液.并使用透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)来表征该分散液,从图 3(a)中可以清楚地看到 MWCNT 的结构.最后通过真空过滤获得厚度为纳米级的 MWCNT 薄膜.将 MWCNT 薄膜覆盖在模式转换器件的中心,形成的集成器件称为可饱和吸收模式转换耦合器(Saturable Absorption Mode Selector Coupler, SA-MSC).通过拉曼光谱仪(WITec GmbH,532 nm)对 MWCNTs 薄膜进行表征,如图 3(b)所示,获得拉曼光谱的三个特征峰分别位于 1 343.2 cm^{-1}、1 572.7 cm^{-1}和 2 685.2 cm^{-1},分别对应 D、G 和 G′模式[21].

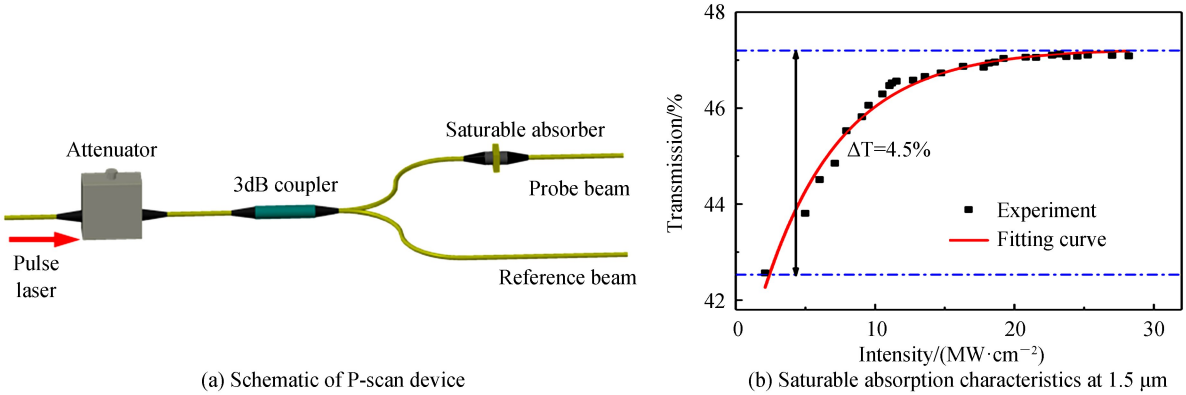


(a) TEM image (b) Raman spectroscopy

图 3 MWCNT 的实验表征结果

Fig.3 Experimental characterization of MWCNTs

通过 P 扫描的方法来研究碳纳米管可饱和吸收体(Saturable Absorber, SA)的光学非线性特性,实验装置如图 4(a)所示.实验中使用的激光源是 NPR 锁模皮秒脉冲光纤激光器(重复频率:20 MHz;脉冲持续时间:8 ps;中心波长:1 560 nm).入射的脉冲激光通过一个可调衰减器对激光功率进行调节,之后通过一个 3 dB耦合器将通过可调衰减器的激光分成功率相同的两束,一束光直接输出作为参考光;另一束激光作为探测光,透射材料后输出,输出的激光由一个双通道功率计同时对两束光的功率进行监测.通过拟合 P 扫描测得的数据,得到如图 4(b)所示的非线性光学特性图,可以看出在 1 560 nm 波长的非线性吸收的调制深度为 4.5%,其对应的饱和强度为 7.2 MW/cm^2.显然,随着泵浦功率的增加,MWCNT 在 1.5 μm 处显示出显著的可饱和吸收特性.



(a) Schematic of P-scan device (b) Saturable absorption characteristics at 1.5 μm

图 4 P 扫描装置和结果

Fig.4 P-scan device and results

2 实验装置

实验装置采用典型的环形腔结构，如图 5 所示.泵浦功率为 600 mW 的 980 nm 半导体泵浦源(pump)由 980/1 560 nm 波分复用器(Wavelength Division Multiplexer，WDM)耦合进入谐振腔内泵浦长度为 50 cm 的掺铒增益光纤(Erbium-Doped Fiber，EDF)(Er110-4/125，LIEKKI)，增益光纤连接一个偏振无关隔离器(Polarization Independent Isolator，PI-ISO)来确保谐振腔内激光的单向传输，隔离器后面连接一个柱矢量光可饱和吸收器件(SA-MSC)，来实现调 Q 柱矢量光的激发.激发的脉冲柱矢量光从少模光纤的耦合输出端(Output2)输出，未激发的基模光从单模光纤输出端输出，在经过一个偏振控制器后连接到 10/90 输出耦合器(Output Coupler，OC)，输出耦合器的另一端连接回波分复用器，组成一个完整的环形谐振腔.PC1(Polarization Controller)用于调节激光腔内脉冲光的偏振状态，PC2 用来过滤其他偏振态的光，以实现更高模式纯度的径向和角向偏振矢量光束输出.腔内参考光从 10/90 耦合器的 10%端口输出，通过光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer，OSA)(YOKOGAWA，AQ6370C)、示波器(Oscilloscope，OSC)(DPO 7254C)、频谱分析仪(Anritsu MS2724C)和功率计(Gentec-EO，MAESTRO)来观察输出激光脉冲的光谱和脉冲序列.输出矢量脉冲激光的光斑由放置在 Output2 处的 CCD 相机测得.

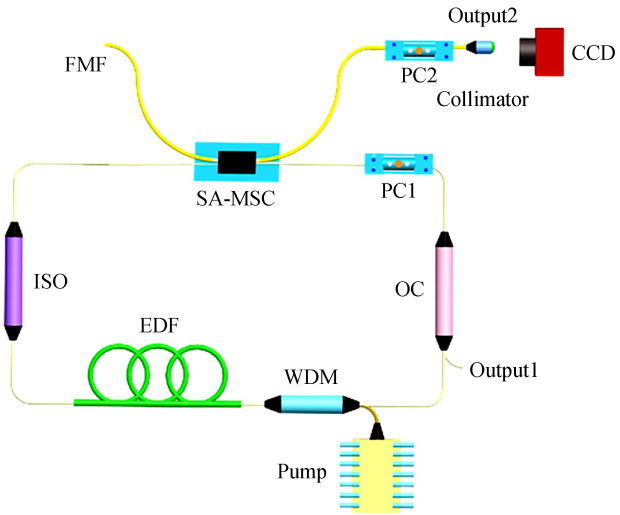


图 5 基于少模光纤的被动调 Q 柱矢量光光纤激光器装置

Fig.5 Device diagram of passive Q-switched cylindrical vector beam fiber laser based on few mode fiber

3 实验结果分析与讨论

当谐振腔中的泵浦功率增加到 100 mW 时，出现稳定的调 Q 激光脉冲，随着泵浦功率的增加，调 Q 状态可以稳定存在，泵浦功率增加到 260 mW 时的脉冲序列如图 6(a)所示.可以看出功率为 260 mW 时其对应输出激光的重复频率和脉冲间隔为 27 kHz 和 37 μs.图 6(b)为当泵浦功率达到 260 mW 时调 Q 激光输出的光谱，从图中可以得知，输出激光的中心波长为 1 560 nm，3 dB 带宽为 2.2 nm.随着泵浦功率的增加激光脉冲的脉冲间隔和脉冲宽度相应减小，而输出光谱基本保持不变.图 6(c)为调 Q 脉冲激光的重复频率和脉冲宽度随着泵浦功率的变化曲线，如图所示，重复频率随着泵浦功率的增加而线性增加(从 5 kHz 到 32 kHz)，脉冲宽度随着泵浦功率的增加迅速减小，当泵浦功率达到 200 mW 时，由于可饱和吸收体的光子吸收接近饱和，继续增加泵浦功率，脉冲宽度减小速度减缓，最后趋于一个稳定值 2.1 μs.激光器的单脉冲能量和峰值功率随着泵浦功率的变化如图 6(d)所示，从图中可以看出随着泵浦功率的增加脉冲激光的单脉冲能量和峰值功率逐渐增加，当泵浦功率达到 260 mW 时基本趋于稳定.

图 7(a)显示了激光器的输出功率随泵浦功率增加线性增加，泵浦功率达到 300 mW 时，激光器的输出功率为 3.6 mW，输出斜率效率为 1.9%.实验采用频谱分析仪来测量调 Q 脉冲在 270 mW 的频谱，如图 7(b)所示(分辨率带宽为 100 Hz)，从图中可以看出基频的频率为 29.8 kHz，信噪比为 43 dB，表明激光器工作在比较稳定的状态.

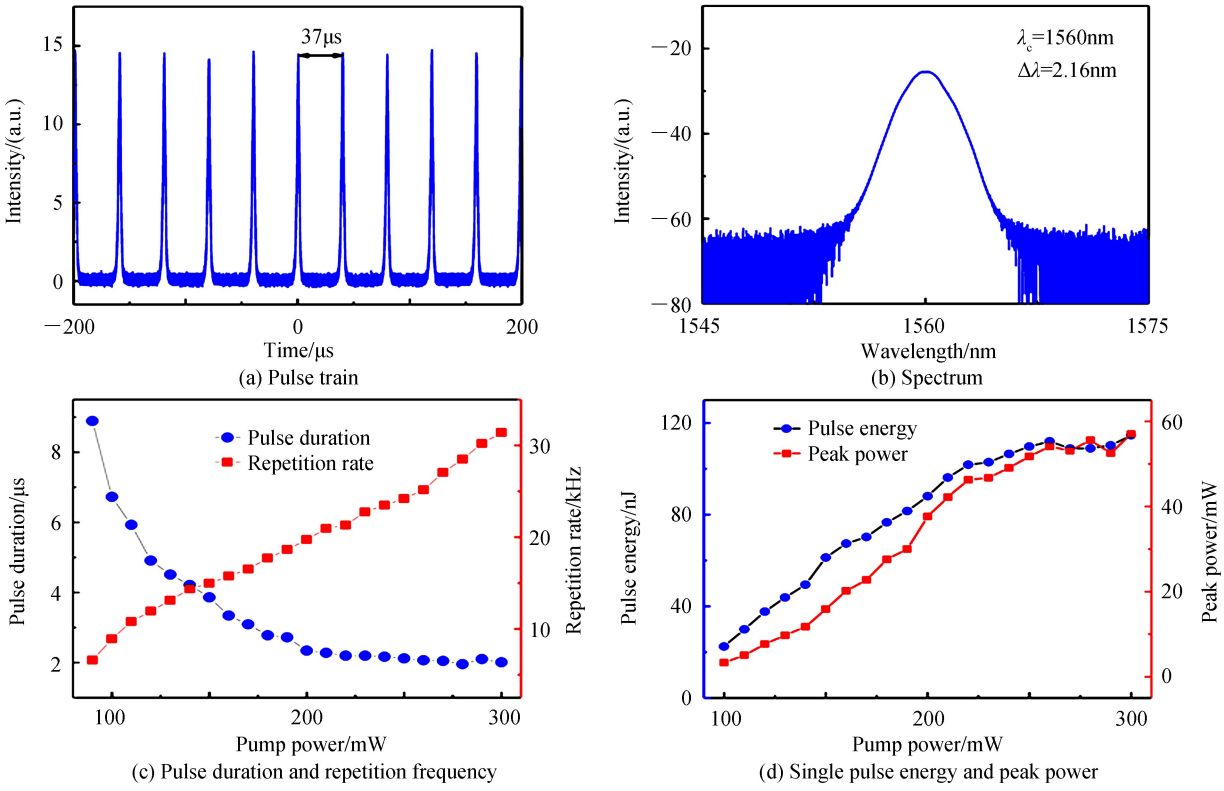


图 6 光纤激光器的脉冲特性

Fig.6 Pulse characteristics of fiber laser

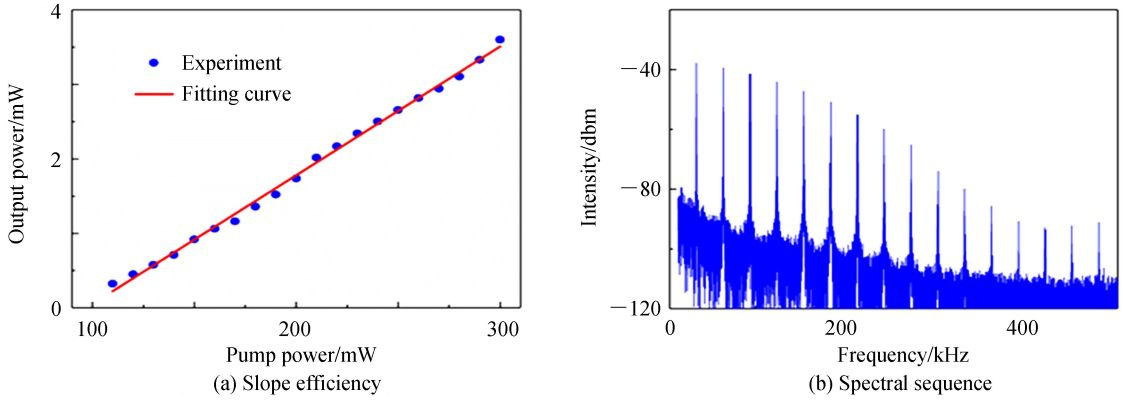


图 7 激光器的输出功率和信噪比

Fig.7 Output power and signal-to-noise ratio of fiber laser

在 Output2 处连接一个光纤准直器(Collimator),并用红外 CCD 相机来观察输出光斑形状.通过精确调节 PC1 和 PC2,实验分别得到高纯度 1.5 μm 角向偏振光束如图 8(a)、(b)所示,和径向偏振光束如图 8(c)、(d)所示.当泵浦功率达到 100 mW 时,调节 PC1 出现稳定的调 Q 现象,随着泵浦功率的增加,调 Q 状态可以稳定存在,之后调节 PC2 直至 Output2 端的 CCD 相机里面出现一个最清晰的中心暗的面包圈状的光斑图,且调节 PC2 对输出调 Q 激光的脉冲波形和光谱特性几乎没有影响.为了验证光斑的模式,在 CCD 和准直器之间插入一个线性偏振片作为检偏器,随着检偏器的旋转,角向偏振光和径向偏振光的两瓣也会相应地旋转,角向偏振光的两瓣光斑的对称轴平行于线性偏振片的偏振方向;径向偏振光的两瓣光斑的对称轴垂直于线性偏振片的偏振方向,因此,可以确认其为角向偏振光和径向偏振光.

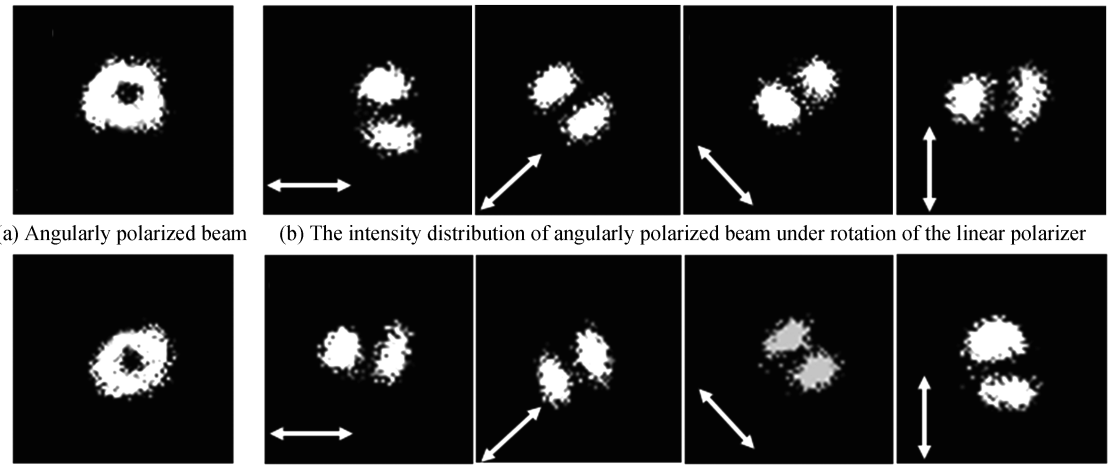


图 8　角向偏振光和径向偏振光的光斑图

Fig.8　Pattern of angularly polarized and radially polarized beam

4　结论

本文提出了一种工作波长在 1.5 μm 的调 Q 柱矢量脉冲光纤激光器，该激光器是由一个基于可饱和吸收和模式选择的集成器件来实现的.实验结果表明，通过调节泵浦功率可以控制激光器输出激光的脉冲宽度、重复频率、峰值功率和单脉冲能量.这种基于全光纤的柱矢量光脉冲激光器具有偏振可调性，可为实际应用提供经济高效的柱矢量光脉冲光源，在模分复用、光纤通信、纳米粒子处理、材料处理、非线性光学等领域有一定意义.

参考文献

[1] ZHAN Qi-wen. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts toapplications[J]. *Asian and Pacific Migration Journal*, 2009, **27**(5): 899-910.

[2] ANGER P, BHARADWAJ P, NOVOTNYL. Enhancement and quenching of single-molecule fluorescence[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **96**(11): 113002.

[3] WANG Xi-li, CHEN Jing, LI Yong-nan, *et al*. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **105**(25): 253602.

[4] DORN R, QUABIS S, LEUCHS G. Sharper focus for a radially polarized lightbeam[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **91**(23): 233901.

[5] CHEN Wei-bin, ZHAN Qi-wen. Optimalplasmonic focusing with radial polarization[C]. SPIE, 2007, 6450: 64500D.

[6] ZHAN Qi-wen. Trapping metallic Rayleigh particles withradial polarization[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(15): 3377-3382.

[7] NIZIEV V G, NESTEROV A V. Influence of beam polarization on laser cuttingefficiency[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1999, **32**(13): 1455-1461.

[8] MUSHIAKE Y, MATSUMURA K, NAKAJIMA N. Generation of radially polarized optical beam mode by laseroscillation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1972, **60**(9): 1107-1109.

[9] POHL D. Operation of a Ruby laser in the purely transverse electric modeTE01[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, **20**(7): 266.

[10] BISSON J F, LI J, UEDA K, *et al*. Radially polarized ring and arc beams of a neodymium laser with an intra-cavity axicon[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(8): 3304-3311.

[11] AHMED M A, HAEFNER M, VOGEL M, *et al*. High-power radially polarized Yb:YAG thin-disk laser with high efficiency[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(6):5093-5104.

[12] ZHENG Rui, GU Chun, WANG An-ting, *et al*. An all-fiber laser generating cylindrical vector beam[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(10): 10834-10838.

[13] BOMZON Z, KLEINER V, HASMAN E. Formation of radially and azimuthally polarized light using space-variant subwavelength metal stripegratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, **79**(11): 1587-1589.

[14] AZZEDINE B. Optical waveguidetheory[M]. Photonic Waveguides: Theory and Applications, 2010.

[15] GROSJEAN T, COURJON D, SPAJER M. An all-fiber device for generating radially and other polarized lightbeams [J]. *Optics Communications*, 2002, **203**(1-2): 1-5.

[16] 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.

[17] CHEN Rui-shan, WANG Jing-hao, ZHANG Xiao-qiang, *et al*. High efficiency all-fiber cylindrical vector beam laser using a long-period fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(4): 755-758.

[18] CHANG Hung-chun, LIN T H, WU T L. Accurate coupling coefficients for fiber couplers with weakly fused cross sections[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(27): 6168-6171.

[19] XIAO Ya-ling, LIU Yan-ge, WANG Zhi, *et al*. Design and experimental study of mode selective all-fiber fused mode coupler based on few mode fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, (20): 221-230.
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，(20)：221-230.

[20] COLEMAN J N, LOTYA M, O'NEILL A, *et al*. Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials[J]. *Science*, 2011, **331**(6017): 568-571.

[21] RITTER U, SCHARFF P, SIEGMUNDC, *et al*. Radiation damage to multi-walled carbon nanotubes and their Raman vibrational modes[J]. *Carbon*, 2006, **44**(13): 2694-2700.

Foundation item: The National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0405102), Key Laboratory of Photoelectron of Education Committee Shaanxi Province, China (No.18JS113)