

空芯反谐振光纤及其高功率超短脉冲传输

高寿飞¹, 汪滢莹^{1*}, 刘小璐¹, 顾 帅¹, 彭志刚¹, 王 璞¹, 杜可明²

¹北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100124;

²Edgewave 公司, Würselen 52146, 德国

摘要 拉制了两种低损耗、单模、近红外宽带传输的空芯反谐振光纤,并用于高功率超短皮秒脉冲传输。利用无节点结构的空芯反谐振光纤实现了平均功率为 74 W、单脉冲能量为 185 μJ 、峰值功率为 10.8 MW 的超短脉冲传输,且输出激光在频域和时域上均没有发生明显变化。

关键词 激光光学; 空芯反谐振光纤; 超短脉冲传输; 单脉冲能量; 峰值功率

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201012

Hollow-Core Anti-Resonant Fiber and Its Use for Propagation of High Power Ultrashort Pulse

Gao Shoufei¹, Wang Yingying¹, Liu Xiaolu¹, Gu Shuai¹, Peng Zhigang¹, Wang Pu¹, Du Keming²

¹National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Edgewave GmbH, Würselen 52146, Germany

Abstract Two types of hollow-core anti-resonant fiber (HC-ARF) with properties of low-loss, single mode, and near-infrared broadband transmission are fabricated, which are used for the efficient propagation of high power picosecond ultrashort pulse. The propagation of a ultrashort pulse with average power of 74 W, single pulse energy of 185 μJ , and peak power of 10.8 MW through a node-less HC-ARF is realized, and the spectral and temporal characteristics of output lasers have no obvious changes.

Key words laser optics; hollow-core anti-resonant fiber; ultrashort pulse propagation; single pulse energy; peak power

OCIS codes 140.3510; 060.2280; 060.2400; 060.5295

1 引 言

空芯微结构光纤通过在纤芯中引入空气缺陷、在包层中引入由石英薄壁和空气孔周期性排列的结构,实现一定波长的光被束缚在空气纤芯中传输。这种光纤兼具光纤的波导性和自由空间光路的无介质性,与传统实芯光纤相比具备一些奇异的特性,如极其小的非线性、较低的模式色散及近乎光速的传输速度等。自 1999 年第一根空芯光子晶体光纤(HC-PCF)问世以来^[1],空芯微结构光纤取得了飞速的发展,根据导光机制划分,有两种主要类型的空芯微结构光纤。第一类空芯微结构光纤是利用光子带隙(PBG)效应来导光的空芯光子晶体光纤^[1],光子带隙的导光原理决定了这类光纤的传输带宽较窄(约 70 THz),不利于宽光谱的应

收稿日期: 2016-09-12; **收到修改稿日期:** 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61675011,61377098,61527822,61235010)、北京市自然科学基金(4142006)

作者简介: 高寿飞(1987—),男,博士研究生,主要从事特种光纤制备、非线性光纤光学和光纤激光器方面的研究。

E-mail: jngaofei@gmail.com

导师简介: 王 璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: wangyingying@bjut.edu.cn

用;除此之外,表面模、小纤芯(10~20 μm)、石英壁中的高能量耦合比例(约 0.5%)及表面散射损耗等问题也限制了其无法应用于高功率激光传输、非线性频率转换和超低损耗传输等。第二类空芯微结构光纤是通过泄漏模导光的空芯反谐振光纤(HC-ARF),当纤芯中掠入射的光的横向传播常数与包层石英壁不发生谐振时,可以视其为一个宽带导光窗口,其一般具有较大的结构尺寸和简单的包层结构。关于这类光纤的研究最早源于2002年英国巴斯大学 Benabid 等^[2]提出的 Kagome 包层结构的空芯光纤,该光纤包层虽然是周期排列的空气孔,但其不具有光子晶体光纤的完整带隙特性。2010年,汪滢莹^[3]提出的内摆线型纤芯结构,使近中红外波段光纤传输损耗降至 40 dB/km 以下^[4],超短脉冲激光损伤阈值高达毫焦量级^[5],并可以在较宽光谱范围内(宽度约 180 THz)实现准单模传输。这两类光纤目前已经广泛应用于跨倍频程的非线性频率转换^[6]、高功率脉冲压缩^[7]、高功率超短脉冲激光传输^[8]、液体气体痕量检测^[9]、生物分子探测^[10]及量子存储^[11]等领域。

2015年10月,本课题组建立了两套光纤拉丝塔,基于堆积控制的方法成功控制了具有不同占空比的实芯光子晶体光纤和具有多种不同结构的空芯光纤,并成功应用于超连续谱的产生以及可见光、近红外和中红外波段的低损耗传输。

本文介绍了两种近红外导光的 HC-ARF,利用中心波长为 1064 nm、脉冲宽度为 17 ps、重复频率为 400 kHz 的高功率超短脉冲激光器进行了超短脉冲传输测试,实现了 74 W 高功率传输,相应的单脉冲能量为 185 μJ。低损耗、宽带宽传输 HC-ARF 的成功控制,为控制该类高性能光纤的研究提供了一定的参考。

2 光纤特性分析

目前,主流的空芯反谐振光纤结构为多圈 Kagome 包层结构和单圈无节点结构,二者导光原理基本相同,即通过纤芯周围石英薄层的反谐振以及包层结构和纤芯之间的抑制耦合来实现低损耗宽通带传输。Kagome 光纤可通过增加包层的圈数来使纤芯远离石英层,一定程度上降低了弯曲损耗和限制损耗,提高了光纤光学性能。相比而言,单圈无节点包层结构光纤的结构更为简单,可直接利用反谐振理论建立模型,其光学性质与 Kagome 结构类似,甚至在单模特性、传输带宽和弯曲特性等方面优于 Kagome 结构。这里以单圈无节点结构光纤为例分析此类光纤的导光原理及光纤性能。

早在 2002 年, Litchinitser 等^[12]就提出将平面波导的反谐振反射波导(ARROW)原理应用于空芯光纤中。当石英壁厚度 t 确定时,若波长满足

$$\lambda_m = \frac{2t}{m} \sqrt{n^2 - 1}, \quad m = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中 n 为石英折射率, N 为整数,则光在石英中会发生谐振,泄漏到包层外。若波长满足

$$\lambda_l = \frac{4t}{2l + 1} \sqrt{n^2 - 1}, \quad l = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

则光在石英中会达到最大反谐振,光会反射回纤芯进行传输。因此, λ_m 为光纤的高损耗波长区域, λ_l 为传输通带的中心。

图 1(a)给出了纤芯直径为 40 μm 的单圈无节点光纤的传输损耗和色散曲线。该光纤由 6 个壁厚为 400 nm、孔径为 24 μm 的石英薄管围成,如图 1(b)中的插图所示。利用商用有限元分析仿真软件 Comsol

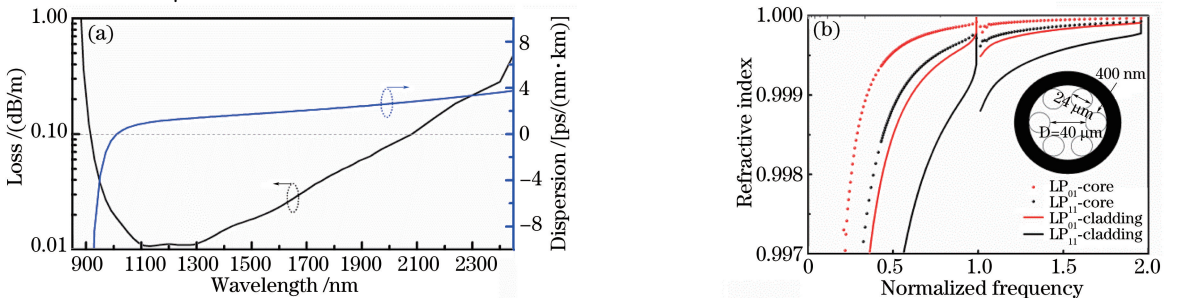


图 1 无节点空芯反谐振光纤的(a)损耗曲线和色散曲线及(b)模式有效折射率曲线

Fig. 1 (a) Loss and dispersion curves and (b) mode effective refractive index curves of node-less HC-ARFs

Multiphysics 结合 Matlab 对该光纤进行仿真计算。结果显示,该光纤可以实现 900~2300 nm 跨倍频程的低损耗传输,在 1060 nm 处的损耗约为 13 dB/km,光纤整体色散小于 4 ps/(nm·km),零色散波长约为 1010 nm。图 1(b)给出了光纤空气纤芯(虚线)和包层空气孔(实线)的基模 LP₀₁(红色)和高阶模 LP₁₁(黑色)的有效折射率。可以看出,纤芯中 LP₁₁的有效折射率和包层中 LP₀₁的有效折射率相近,满足相位匹配条件,出现共振耦合,导致纤芯中的 LP₁₁模泄漏到包层中,而纤芯中的 LP₀₁模则保持低损耗传输,实现了有效单模。因此,无节点单层结构可以表现出低损耗、低色散、宽传输通带及有效单模的光学性能。

3 光纤制备

利用毛细管堆积和拉制的办法,在光纤拉丝塔中通过精确控制拉丝温度、拉丝速度和纤芯/包层气压等参数拉制出了两款 HC-ARF,图 2(a)、(b)给出了内摆线型 Kagome HC-ARF 的光学显微镜图像和扫描电子显微镜(SEM)图像,图 2(c)、(d)给出了无节点 HC-ARF 的光学显微镜图像和 SEM 图像。其中 Kagome HC-ARF 的光纤直径为 175 μm,纤芯直径为 49 μm,包层孔间距为 20 μm,最内侧一圈纤芯壁的厚度约为 510 nm;无节点 HC-ARF 的光纤直径为 145 μm,纤芯直径为 40 μm,包层孔直径为 24 μm,包层石英壁的厚度约为 400 nm。两款光纤的纤芯形状都展现出了负曲率内摆线型结构。

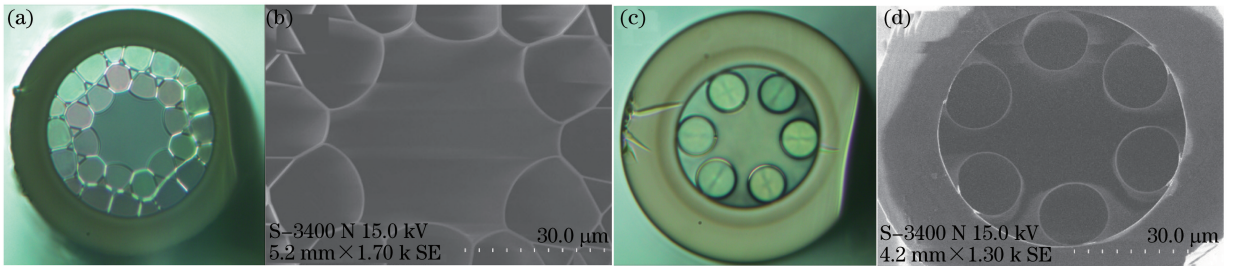


图 2 内摆线型 Kagome HC-ARF(上)和无节点 HC-ARF(下)的(a) (c)光学显微图像和(b) (d)SEM 图像
Fig. 2 (a) (c) Optical microscope images and (b) (d) SEM images of hypocycloid-core Kagome HC-ARF (upper) and node-less HC-ARF (down)

利用超连续谱光源分别测量了内摆线型 Kagome HC-ARF 和无节点 HC-ARF 在不同长度下的传输谱。图 3(a)给出了长度为 5 m(黑色曲线)和 35 m(红色曲线)的 Kagome HC-ARF 传输谱,可以看出其传输

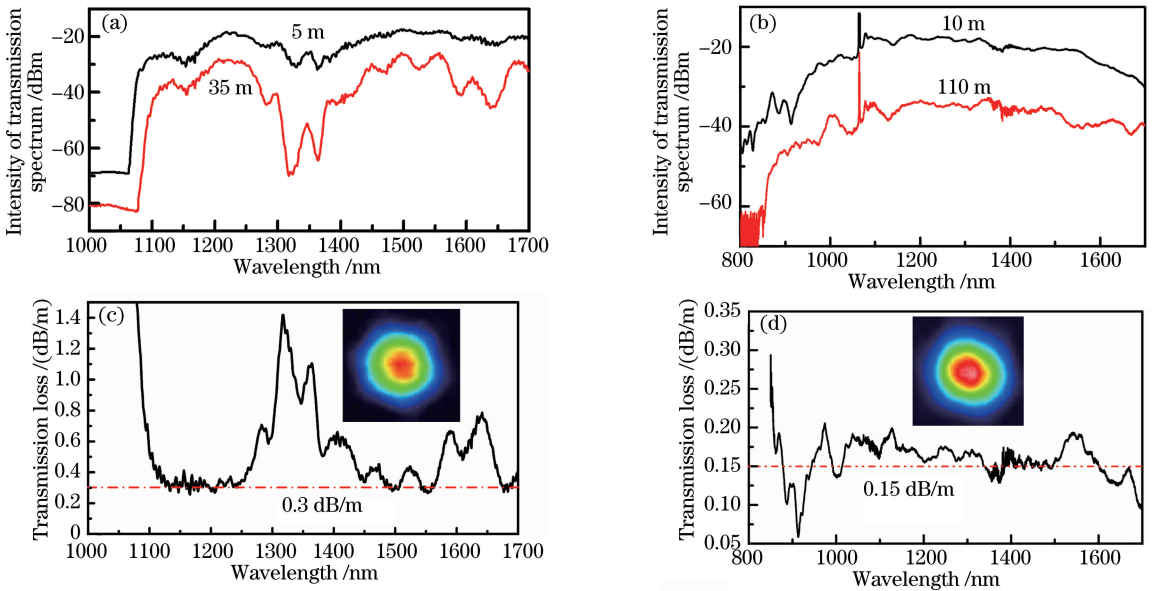


图 3 内摆线型 Kagome HC-ARF(左)和无节点 HC-ARF(右)的(a) (b)传输谱和(c) (d)损耗谱
Fig. 3 (a) (b) Transmission spectra and (c) (d) loss spectra of hypocycloid-core Kagome HC-ARF (left) and node-less HC-ARF (right)

带宽从 1100 nm 到 1700 nm 以上(长波长方向受限于光谱仪的测量范围)。图 3(b)给出了长度为 10 m(黑色曲线)和 110 m(红色曲线)的无节点 HC-ARF 传输谱,其传输带宽从 850 nm 到 1700 nm 以上,其中波长 1060 nm 附近的尖峰是输入的超连续谱中自带的残余抽运光。利用超连续谱光源和截断测量的办法分别测得了内摆线型 Kagome HC-ARF 和无节点 HC-ARF 的传输损耗,如图 3(c)、(d)所示。

图 3(c)给出了内摆线型 Kagome HC-ARF 的传输损耗,该损耗是通过将长度为 35 m 的 Kagome HC-ARF 截断成 5 m 计算得出。根据(1)式算得内摆线型 Kagome HC-ARF 的第一阶高损耗波长位于 1071 nm 处,与图 3(c)所示的 1076 nm 处的高损耗峰基本保持一致。由图 3(c)可以看到,光纤在波长 1120~1250 nm 之间的传输损耗约为 0.3 dB/m,该光纤在 1550 nm 处的传输损耗更是低至 0.26 dB/m。根据文献[13],由于内摆线上的石英壁厚度的变化,传输通带内会多出现一个损耗峰,即波长 1260~1430 nm 之间的高损耗区域。图 3(c)中的插图为波长 1550 nm 激光光束经过长度为 5 m 的 Kagome HC-ARF 后输出的近场模式分布。

图 3(d)给出了无节点 HC-ARF 的传输损耗,该损耗是通过将长度为 110 m 的无节点 HC-ARF 截断成 10 m 计算得出。根据(1)式算得无节点 HC-ARF 的第一阶高损耗波长位于 820 nm 处,与图 3(c)所示的 830 nm 处的高损耗峰基本保持一致。由图 3(d)可以看到,光纤在波长 950~1700 nm 之间的传输损耗平均值在 0.15 dB/m 附近。与 Kagome HC-ARF 不同的是,无节点 HC-ARF 结构石英壁厚度比较均匀,因此在导光通带内不会出现第二个高损耗峰。图 3(d)中的插图为波长 1064 nm 激光光束经过 10 m 的无节点 HC-ARF 后输出的近场模式分布。

4 高功率超短脉冲传输

为了进一步证实 HC-ARF 在近红外波长处具有低传输损耗和高功率超短脉冲传输的潜力,利用该光纤进行了高功率超短脉冲传输测试。实验装置如图 4 所示。测试使用的激光光源是由德国 Edgewave 公司提供的脉冲宽度为 17 ps,重复频率为 400 kHz,中心波长为 1064 nm 的高功率超短脉冲激光器。利用半波片和偏振光分束器(PBS)进行功率调节。选择 60 mm 的平凸透镜作为耦合透镜,聚焦后得到的光斑直径为 27 μm 。将超短脉冲激光耦合进光纤,耦合效率约为 68%。测试光纤为无节点 HC-ARF,光纤长度大约为 1 m。

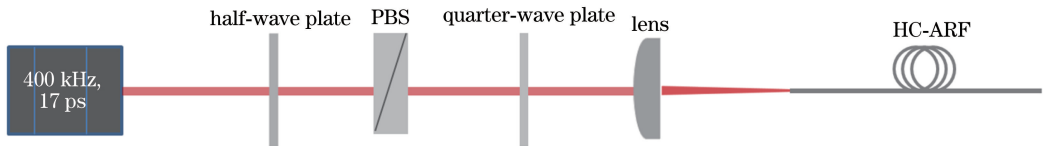


图 4 高功率超短脉冲传输测试装置

Fig. 4 Test setup of high power ultrashort pulse propagation

利用上述实验装置,通过调节半波片以调整耦合进入光纤的激光功率,在光纤的末端用功率计测量相应的输出功率,结果如图 5 所示。将最大单脉冲能量为 185 μJ 的超短脉冲激光耦合到 1 m 长的 HC-ARF 中,得到最大单脉冲能量为 124 μJ 的输出结果,没有达到光纤的损伤阈值,此时对应的输入平均功率为 74 W(输出 50 W),脉冲的峰值功率达到 10.8 MW,对应的能量和峰值功率密度分别为 32.3 J/cm² 和 1.9 TW/cm²。图 5 中

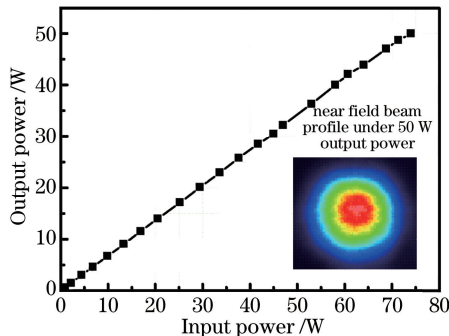


图 5 超短脉冲激光经过 1 m 长 HC-ARF 的耦合传输效率

Fig. 5 Coupling transmission efficiency for ultrashort pulse passing through a 1 m long HC-ARF

的插图给出了光纤末端输出功率 50 W 水平下的近场模式分布图。

为了进一步研究激光脉冲经过 HC-ARF 的时域和频域特性,使用海洋光学光谱分析仪和自相关仪进行了脉冲经过空芯光纤前后的对比实验。图 6(a)、(b)给出了平均功率为 50 W 的超短脉冲激光经过 1 m 长 HC-ARF 前后的光谱和自相关迹图像。由图 6(a)可以看到,经过 HC-ARF 传输之后光谱形状没有发生明显变化,并且没有额外的波长产生,说明没有非线性效应产生。由图 6(b)可以看出,传输脉冲的自相关迹形状和宽度与初始脉冲相比没有明显变化,这与图 1(a)仿真计算结果一致。该光纤在 1060 nm 处具有非常低的色散,约为 0.6 ps/(nm·km),进一步说明了没有非线性效应产生。这一实验结果证实了 HC-ARF 可用于高功率超短脉冲传输。

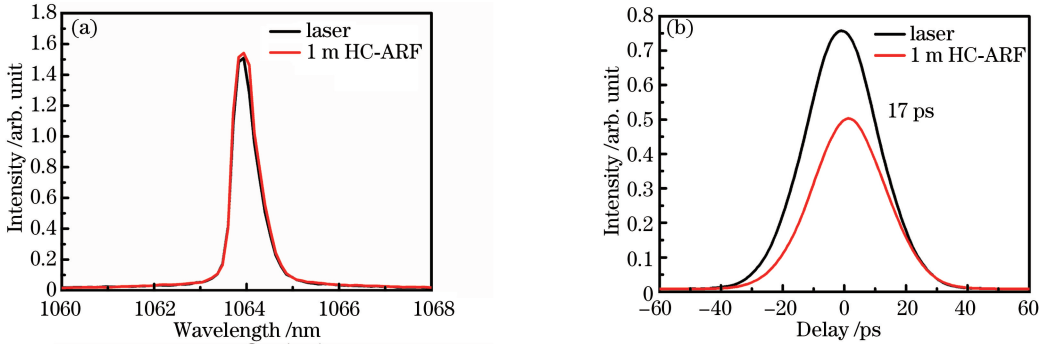


图 6 (a)光谱和(b)自相关迹

Fig. 6 (a) Optical spectra and (b) autocorrelation traces

5 结 论

拉制了两种低损耗、单模、近红外宽带传输的空芯反谐振光纤。对无节点 HC-ARF 进行了高功率超短脉冲传输实验,测得最大平均传输功率为 74 W,对应的单脉冲能量为 185 μ J、峰值功率为 10.8 MW。高功率超短脉冲激光经过该光纤传输之后频域和时域均没有发生明显变化,进一步证明了 HC-ARF 在高功率超短脉冲柔性传输应用上的潜力。

参 考 文 献

- [1] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, *et al.* Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [2] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, *et al.* Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399-402.
- [3] Wang Y Y, Wheeler N V, Couny F, *et al.* Low loss broadband transmission in hypocycloid-core Kagome hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 669-671.
- [4] Wang Y Y, Peng X, Alharbi M, *et al.* Design and fabrication of hollow-core photonic crystal fibers for high power fast laser beam transportation and pulse compression[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3111-3113.
- [5] Beaudou B, Gerôme F, Wang Y Y, *et al.* Millijoule laser pulse delivery for spark ignition through Kagome hollow-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1430-1432.
- [6] Couny F, Benabid F, Roberts P J, *et al.* Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs[J]. *Science*, 2007, 318(5853): 1118-1121.
- [7] Heckl O H, Saraceno C J, Baer C R E, *et al.* Temporal pulse compression in a xenon-filled Kagome-type HC-PCF at high average power[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19142-19149.
- [8] Urich A, Maier R R J, Mangan B J, *et al.* Delivery of high energy Er:YAG pulsed laser light at 2.94 μ m through a silica hollow core photonic crystal fibre[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6677-6684.
- [9] Cubillas A M, Unterkofler S, Euser T G, *et al.* Photonic crystal fibres for chemical sensing and photochemistry[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(22): 8629-8648.
- [10] Dinish U S, Fu C Y, Soh K S, *et al.* Highly sensitive SERS detection of cancer proteins in low sample volume using hollow core photonic crystal fiber[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 33(1): 293-298.

- [11] Sprague M R, Michelberger P S, Champion T F M, *et al.* Broadband single-photon-level memory in a hollow-core photonic crystal fibre[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 287-291.
- [12] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, *et al.* Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [13] Debord B, Alharbi M, Benoît A, *et al.* Ultra low-loss hypocycloid-core Kagome hollow-core photonic crystal fiber for green spectral-range applications[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6245-6248.