

文章编号:1001-5078(2025)01-0155-06

· 光纤传感及光通讯技术 ·

Kagome 空芯光纤的脉冲激光传输特性研究

王浪¹, 崔建丰^{1,2}, 岱钦¹, 栾智杰¹, 鄢小娇², 李福玖², 乌日娜¹
(1. 沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 鞍山紫玉激光科技有限公司, 辽宁 鞍山 114044)

摘要: 为了研究空芯光纤对纳秒脉冲激光的传输能力, 使用 Kagome 型反谐振空芯光纤进行了 1064 nm 脉冲激光的传输实验。光纤的纤芯直径为 60 μm , 数值孔径为 0.02。使用中心波长为 1064 nm, 脉冲宽度为 8.4 ns 的电光调 Q 激光器作为光源, 测试了光纤在纳秒脉冲激光传输中的光束模式及传能效果。结果显示, 该空芯光纤能够在保持基模的状态下, 稳定传输 10.25 mJ 的纳秒脉冲, 传输效率高达 88%。此外, 还系统分析了高功率脉冲激光对空芯光纤的损伤机理过程。研究结果表明, Kagome 型反谐振空芯光纤在 1064 nm 波段能够实现 10 mJ 的纳秒脉冲传输, 可以用作激光触发真空开关技术等应用的柔性光源。

关键词: 激光光学; 脉冲传输; 光纤耦合; Kagome 型反谐振空芯光纤

中图分类号: TN248; TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.022

Characterization of pulsed laser transmission in Kagome hollow-core fiber

WANG Lang¹, CUI Jian-feng^{1,2}, DAI Qin¹, LUAN Zhi-jie¹, WU Xiao-jiao², LI Fu-jiu², UZHINA¹
(1. School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. Anshan ZY Laser Technology Co., Ltd., Anshan 114044, China)

Abstract: In order to investigate the transmission capability of hollow-core fibers for nanosecond pulsed lasers, 1064 nm pulsed laser transmission experiments are carried out using a Kagome-type anti-resonant hollow-core fiber. The core diameter of the fiber is 60 μm and the numerical aperture is 0.02. Using an electro-optic Q-modulated laser with a central wavelength of 1064 nm and a pulse width of 8.4 ns as the light source, the beam pattern and energy transfer effect of the fiber in nanosecond pulsed laser transmission are tested. The results show that the hollow-core optical fiber is capable of stably transmitting nanosecond pulses of 10.25 mJ with transmission efficiency as high as 88% while maintaining the fundamental mode. In addition, the damage mechanism process of high-power pulsed laser on the hollow-core fiber is systematically analyzed. The results show that the Kagome-type anti-resonant hollow-core fiber is capable of transmitting 10 mJ nanosecond pulses in the 1064 nm band and can be used as a flexible light source for applications such as laser-triggered vacuum switching technology.

Keywords: laser optics; pulse transmission; fiber coupling; Kagome-type anti-resonant hollow-core fiber

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2022YFB4601603); 2022 年辽宁省“揭榜挂帅”科技计划重点项目; 沈阳理工大学光选科研团队建设项目资助。

作者简介: 王浪 (1997 -), 男, 土家族, 硕士生, 主要研究方向为激光器件与应用技术。E-mail: 1689330015@qq.com

通讯作者: 乌日娜 (1978 -), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为液晶物理与器件, 激光技术及应用。E-mail: wurina2007@126.com

收稿日期: 2024-05-20

1 引言

高功率激光器的最新研究进展及其在激光医疗、机械加工、激光传感和激光触发真空开关技术^[1-4]等应用中要求激光能在 1 m 以上的光学系统中实现灵活、高质量的光束传输。一个理想的脉冲激光传输解决方案需要低传输损耗、低色散、高激光损伤阈值,并且在较大带宽范围内实现单模传输。光纤在柔性激光传输方面具有重要的研究价值,然而,传统石英光纤存在高色散、高非线性和低材料损伤阈值等本征材料缺陷^[5],限制了高功率、短脉冲激光通过光纤传输的范围。事实上,石英光纤对于 1064 nm 波段脉冲激光的损伤阈值仅为 3.85 GW/cm²^[6]。空芯光子晶体光纤(HCT-PCF)的纤芯为空心,因其独特的包层结构可以将光束束缚在光纤内部中空部分进行传输,提供了接近自由空间条件的光束传输^[7]。随着 HC-PCF 的发展,其光学性能得到极大提升,过去十几年研究报道证明,使用空芯光纤是替代传统石英光纤实现高功率脉冲激光传输的一种稳定可行方案^[8-10]。

近年来,对于空芯光子晶体光纤的研究主要以空芯光子带隙光纤(HC-PBG)和空芯反谐振光纤(HC-ARF)两种类型光纤为主。HC-PBG 的传输带宽较窄,不利于宽光谱的应用,主要受到表面模、小芯径(10~20 μm)、石英壁中的高能量耦合比例(约 0.5%)以及表面散射损耗等问题影响,限制了其在高功率激光传输、非线性频移转换和超低损耗传输等方面的实际应用^[11]。而 HC-ARF 因其具有高模态纯度、超低损耗、大模场直径和低弯曲灵敏度等优势,在高功率脉冲激光传输中展现出重要的研究价值^[12]。2017 年, N. V. WHEELER 研究团队^[13]报道的 Kagome 型反谐振空芯光纤,在 1 μm、1.55 μm 和 2.5 μm 波段的传输损耗均低于 15 dB/km,对于近中红外波段的高功率脉冲激光传输研究具有极其重要的意义。

随着对柔性激光光源的需求不断增长,对空芯光纤进行纳秒脉冲激光传输的研究变得尤为迫切。国外已经开展了相关研究。2012 年,英国巴斯大学的 B. Beaudou 等人^[14]利用 Kagome 型反谐振空芯光纤实现了中心波长为 1064 nm、脉冲宽度为 9 ns、脉冲能量为 10 mJ 的激光传输,并成功展示了柔性激光诱导火花点火测试。2014 年,美国科罗拉多州立

大学的 Ciprian Dumitrache 等人^[15]采用 Kagome 型反谐振空芯光纤实现了中心波长为 1064 nm、脉冲宽度为 12 ns、脉冲能量为 11 mJ 的激光传输,并成功应用于发动机点火。2022 年,法国阿基坦光学研究所的 Forian Leroi 等人^[16]利用无节点反谐振空芯光纤实现了中心波长为 303 nm、脉冲宽度为 10 ns、平均功率为 20 W 的激光传输。然而,国内在利用空芯光纤进行高功率纳秒脉冲激光传输方面的研究报道相对较少。2021 年,国防科技大学的崔宇龙等人^[17]采用反共振空芯光纤与石英端帽相熔接方式,实现了千瓦级的 1080 nm 连续激光传输。2022 年,北京工业大学的鲁文举等人^[18]利用无节点反谐振空芯光纤实现了中心波长为 1064 nm、脉冲宽度为 15 ps、平均功率为 37 W 的激光传输。2024 年,中国科学院合肥物质科学研究院的黄磊等人^[19]使用无节点反谐振空芯光纤实现了中心波长为 2.79 μm、脉冲能量为 11.78 mJ 的静态激光传输。因此,本文基于 Kagome 型反谐振空芯光纤进行了高功率纳秒脉冲激光传输特性研究。最终,经过透镜准直和聚焦,空芯光纤传输的激光实现了 TW 级的峰值功率密度。这一成果有望进一步应用于激光触发真空开关技术,并推动相关领域的研究进展。

2 实验装置

2.1 实验装置

本课题使用的激光光源为鞍山紫玉激光科技公司提供的一台中心波长为 1064 nm、脉冲宽度为 8.4 ns、重复频率为 1~10 Hz 的电光调 Q 激光器。选择 1 Hz 的重复频率进行实验,输出 1064 nm 激光的最大脉冲能量为 20 mJ,能量不稳定性低于 1.2%。激光器输出激光经过焦距为 1 m 的平凸透镜进行聚焦,使用 CCD 相机在透镜聚焦点附近采集多组光束的束腰直径和远场发散角数据。经过处理分析,得到激光器的发散角为 1.22 mrad,光束指向性为 14.97 μrad,光束质量 M^2 为 1.4 ± 0.04 。

搭建 Kagome 型反谐振空芯光纤激光传输实验装置,如图 1 所示。首先,使用半波片($\lambda/2$)和偏振光分束器(PBS)组成的激光能量衰减器,对激光器输出激光进行能量控制。接着,利用两个高反射率反射镜(M1~M2, R_{abs}>99.5%@1064 nm)对激光器输出激光的传输方向进行调整。将剥除外纤维涂覆层的空芯光纤直接放置在 V 型槽光纤固定架

上,并使用两个磁性压块固定。将两个 V 型槽固定架和透镜固定在高精度多轴位移台上。通过调节反射镜和位移台,将聚焦后的激光耦合进光纤中,再利用透镜对光纤末端输出激光进行准直和聚焦处理。最后,进行能量测试和光学性能评估。

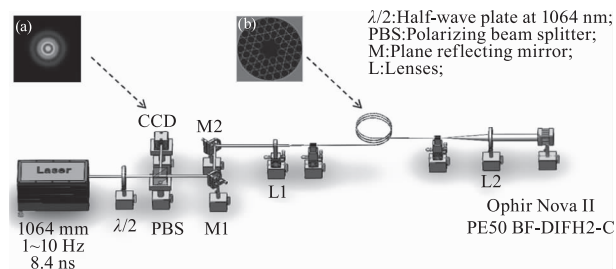


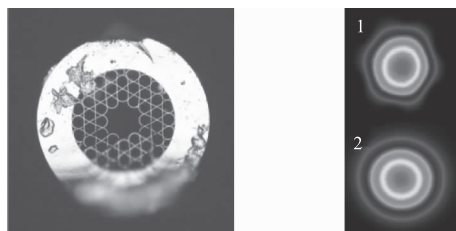
图1 Kagome 型反谐振空芯光纤激光传输实验装置

Fig. 1 Kagome-type anti-resonant hollow-core fiber laser transmission experimental setup

2.2 Kagome 型反谐振空芯光纤

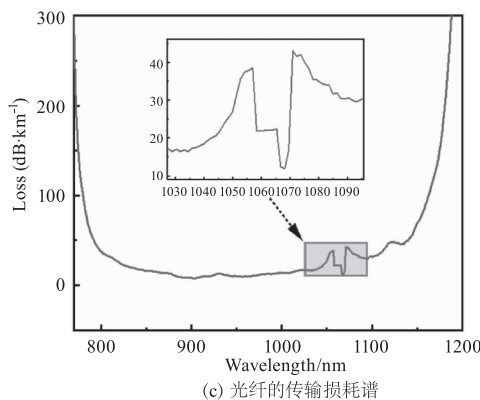
考虑到光纤在进行高功率脉冲激光传输的过程中容易损伤,采用中国电子科技集团公司第46研究所提供的 Kagome 型反谐振空芯裸纤进行实验研究。该光纤在 1064 nm 波段具有单模传输、低损耗、低色散等优异光学特性。具有负曲率包层形状的反谐振空芯光纤相较于多边包层形状的冰激凌空芯光纤具有更低的传输损耗。通过合理设计包层玻璃壁的厚度、纤芯形状和节距,可以显著扩展光纤传输带宽,减少包层模式和核心模式之间的耦合,从而降低传输损耗。

使用 3D 测量显微镜(奥林巴斯 LS4000)对光纤截面进行表面形貌观察。如图 2(a)所示,光纤包层结构为七单元芯三环线型,纤芯直径为 60 μm,包层直径为 320 μm,纤维涂覆层为 560 μm,数值孔径为 0.02,有效模场直径为 45 μm。光纤在 1064 nm 波段输出近场模式和远场模式如图 2(b)所示。根据图 2(c),该光纤传输带宽范围为 800 ~ 1150 nm,在 1030 ~ 1064 nm 工作波段的传输损耗低于 40 dB/km。



(a) 光纤截面3D显微镜图

(b) 光纤输出近场模式1及远场模式2示意图



(c) 光纤的传输损耗谱

图2 Kagome 型反谐振空芯光纤截面 3D 显微镜图、光纤输出模式示意图及传输损耗谱

Fig. 2 3D microscope view of the cross-section of a Kagome-type anti-resonant hollow-core fiber, schematic diagram of fiber output modes and transmission loss spectrum

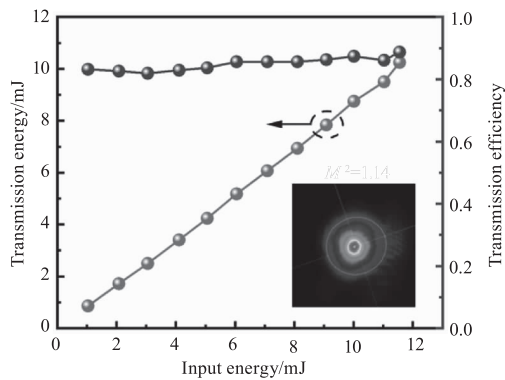
3 实验结果及分析

3.1 高功率激光脉冲传输及聚焦效果

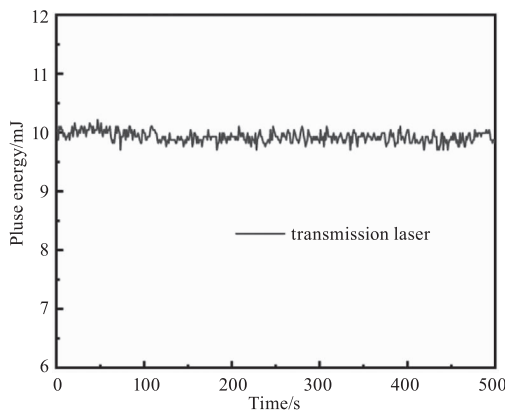
如图 1(a)所示,使用 CCD 相机测试 1064 nm 激光的光束直径为 1.55 mm。选择焦距为 30 mm 的平凸透镜(L1)对光束进行聚焦,聚焦后光束的束腰直径($1/e^2$)为 43 μm,与空芯光纤的有效模场直径相近,有利于实现高效率的耦合。

实验选用长度为 3 m 的 Kagome 型反谐振空芯光纤。在耦合过程中使用静态激光进行调试,并利用红外激光探测卡和能量计(Ophir NovaII, PE50BF-DIFH2-C)在光纤末端检测光束模式和能量变化,通过精确调节反射镜和高精度多轴位移台的 X、Y、Z 轴位置,逐步提升耦合状态至最佳,确保耦合效率不再提高且出射光斑达到类基模状态。随后进行动态激光测试,并逐渐增加入射脉冲能量,通过控制半波片的旋转角度,最终测试光纤的稳定传输效率和最大输出脉冲能量。

图 3(b)为空芯光纤在输出功率为 8.5 mJ 水平下的近场模式。当高功率 1064 nm 脉冲激光通过光纤传输后,仍然能够维持高斯轮廓的基模特征。通过计算,得出空芯光纤末端输出激光的光束质量(M^2)为 1.14 ± 0.05 。从图 3(a)中可以看出,当最大入射脉冲能量为 11.55 mJ 时,长度为 3 m 的空芯光纤能够以 88 % 的效率稳定输出 10.25 mJ 的纳秒脉冲。在最大输出脉冲能量情况下,进行了空芯光纤传输激光的稳定性测试,结果显示稳定性为 1.02 %,如图 3(b)所示。



(a) 光纤传输效率及传能效果 (光纤输出光束近场模式图)



(b) 光纤传输脉冲激光的稳定性

图 3 脉冲激光经过 Kagome 型反谐振空芯光纤的传输效率、输出光束近场模式及稳定性

Fig. 3 Transmission efficiency, output beam near-field mode, and stability of a pulsed laser through a Kagome-type anti-resonant hollow-core fiber

在激光诱导等离子体点火技术和激光触发真空开关技术中,为了确保其稳定可靠的运行,激光光源的峰值功率密度需要达到 10^{11} W/cm² 或更高。通过将准直后光斑直径 D_0 和聚焦透镜焦距 f 代入(1)式中计算,可以得到聚焦后的最小光斑直径 d_0 :

$$d_0 = \frac{4M^2 f \lambda}{\pi D_0} \quad (1)$$

式中, M^2 为光纤输出激光的光束质量; λ 为激光波长。将(1)式中计算获得的最小光斑直径 d_0 代入(2)式,可以获得聚焦点处的最大峰值功率密度 I :

$$I = E_{\text{pulse}} / (t_{\text{pulse}} \cdot \pi \left(\frac{d_0}{2}\right)^2) \quad (2)$$

式中, E_{pulse} 为光纤输出的脉冲能量; t_{pulse} 为脉冲宽度; d_0 为聚焦后的最小光斑直径。分析上述公式发现,在保持聚焦透镜焦距不变的情况下,准直后的光斑直径 D_0 与聚焦后的光斑直径 d_0 成反比,在满足

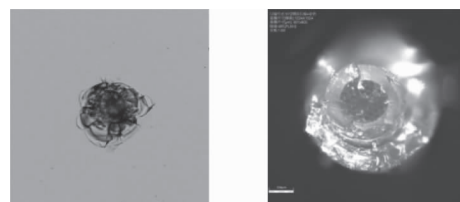
光纤数值孔径的匹配条件下,同时使用长焦距透镜进行准直和短焦距透镜进行聚焦,可以实现最佳的聚焦效果。

最终,经过理论计算分析,光纤输出的激光使用焦距为 250 mm 的平凸透镜(L2)进行准直,准直后的光束使用焦距为 50 mm 的平凸透镜进行聚焦。在光纤输出最大 10.25 mJ 的纳秒脉冲情况下,可以实现聚焦点处 1.1 TW/cm² 的峰值功率密度。

3.2 空芯光纤的损伤机理分析

高功率纳秒脉冲激光造成空芯光纤损伤主要发生在光纤入射端面 and 光纤出射端面这两个位置。事实上,由于空芯光纤的独特结构,其核心为空心状态,相较于传统的实心光纤,激光诱导击穿空气等离子体的峰值功率密度要大于材料的激光损伤阈值。因此,在高功率脉冲激光传输方面,空芯光纤具有显著优势。然而,面对几十微米的光纤芯径,实现高功率、高质量的脉冲激光传输仍面临巨大挑战。

通过使用未镀膜的石英窗口片测试高功率纳秒脉冲激光聚焦后的损伤能力,发现仅在 5.87×10^9 W/cm² 的峰值功率密度下,石英窗口片出现破坏性损伤,而空芯光纤出现损伤的峰值功率密度为 4.74×10^{10} W/cm²。如图 4(a)所示,强激光与玻璃介质的相互作用主要分为介质的非线性电离、激光能量沉积和激光等离子体膨胀三个过程。非线性电离过程首先从焦点处最先击穿,随后沿激光传输方向扩散,形成一条等离子通道。激光能量沉积到等离子通道后向外膨胀,产生的冲击波对临界介质造成热熔挤压和膨胀断裂等作用,最终导致光纤出现不可逆性损伤。尽管空芯光纤核心为空心,但随着输入脉冲能量增加,其等离子体吸收能量膨胀,最终产生的冲击波和高温会破坏光纤的包层结构。当输入脉冲能量为 12.07 mJ 时,光纤耦合端聚焦点处的峰值功率密度已经超出光纤材料的承受值,导致光纤损伤,如图 4(b)、(c)、(d)所示。



(a) 损伤石英窗口片图

(b) 损伤光纤截面图

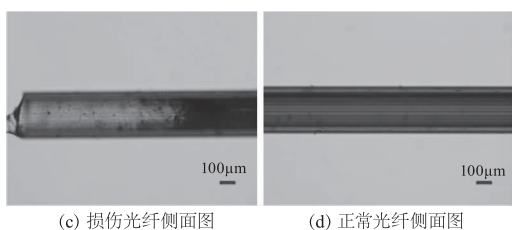


图4 高峰值功率脉冲激光损伤的石英窗口片及光纤的3D显微镜图

Fig. 4 3D microscopy of quartz window sheet and fiber damaged by high peak power pulsed laser light

在实验过程中,还发现激光功率波动、光束指向性漂移、光纤包层缺陷和光纤端面污染等因素对实际耦合效率、输出光束质量和输出脉冲能量有显著影响,容易导致光纤损伤。

4 结论

本文基于激光触发真空开关技术等应用对柔性光源的需求,使用 Kagome 型反谐振空芯光纤对高功率纳秒脉冲激光的传输特性开展研究。所使用光纤的包层结构为七单元芯三环线型,纤芯直径为 $60\ \mu\text{m}$,包层直径为 $320\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.02,传输损耗低于 $40\ \text{dB/km}@1064\ \text{nm}$ 。在不考虑其他因素损耗情况下,实现 88% 的高传输效率,输出 10.25 mJ 的纳秒脉冲,聚焦后的峰值功率密度高达 $1.1\ \text{TW/cm}^2$ 。最后,系统分析了高功率纳秒脉冲激光对空芯光纤损伤机理过程,发现激光功率波动、光束指向性漂移、光纤包层缺陷和光纤端面污染会直接影响空芯光纤的实际传输效果。

参考文献:

- [1] Hu Guoqing, Guan Kai, Lu Libin, et al. Laser micromachining of functional surfaces for biomedical clinical applications[J]. Engineering, 2018, 4(6): 172 - 190. (in Chinese)
胡国庆,管凯,卢立斌,等.面向生物医学临床应用的激光微加工功能表面[J]. Engineering, 2018, 4(6): 172 - 190.
- [2] Zheng Haohua, Liu Jiawei, Deng Yajie, et al. Microstates and micropatterning of materials for processing and visualisation applications[J]. Materials Guide, 2024, 38(16): 90 - 97. (in Chinese)
郑皓华,刘家伟,邓雅洁,等.材料微型态与微图案加工及可视化应用[J].材料导报, 2024, 38(16): 90 - 97.
- [3] Yu R, Chen Y, Shui L, et al. Hollow-core photonic crystal fiber gas sensing[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2996.
- [4] Sun Yifan, Lu Gang, Meng Qingxin, et al. Structural design of 300 kV laser-triggered multistage vacuum switch [J]. Vacuum Electronics Technology, 2023, (5): 43 - 49. (in Chinese)
孙一帆,卢刚,孟庆鑫,等.300 kV 激光触发多级真空开关结构设计[J].真空电子技术, 2023, (5): 43 - 49.
- [5] V S A, T D B. Bulk and surface laser damage of silica by picosecond and nanosecond pulses at 1064 nm [J]. Applied Optics, 2008, 47(26): 4812 - 4832.
- [6] Zhao Xinghai, Gao Yang, Xu Meijian, et al. Characteristics of nanosecond laser-induced end-face damage in quartz optical fibres [J]. Physics Letters, 2008, (8): 5027 - 5034. (in Chinese)
赵兴海,高杨,徐美健,等.纳秒激光诱导石英光纤端面损伤特性研究[J].物理学报, 2008, (8): 5027 - 5034.
- [7] Ding Wei, Wang Yingying, Gao Shoufei, et al. Advances in light-conducting mechanism and experimental fabrication of high-performance anti-resonant hollow-core optical fibres [J]. Physics Letters, 2018, 67(12): 50 - 67. (in Chinese)
丁伟,汪滢莹,高寿飞,等.高性能反谐振空芯光纤导光机理与实验制作研究进展[J].物理学报, 2018, 67(12): 50 - 67.
- [8] Johan B, Cyril V, Michael B, et al. High energy ultrashort pulse delivery through hollow-core photonic crystal fiber [C]//Components and Packaging for Laser Systems VII, 2021: 11667.
- [9] Deng A, Gavara T, Hassan M R A, et al. Microjoule-level mid-infrared femtosecond pulse generation in hollow-core fibers [J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(6): 1.
- [10] Piotr J, Fei Y, J M R R, et al. Picosecond and nanosecond pulse delivery through a hollow-core negative curvature fiber for micro-machining applications [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22742 - 22753.
- [11] Gao Shoufei, Wang Yingying, Liu Xiaolu, et al. Hollow-core anti-resonant fibre and its high-power ultrashort pulse transmission [J]. China Laser, 2017, 44(2): 157 - 162. (in Chinese)
高寿飞,汪滢莹,刘小璐,等.空芯反谐振光纤及其高功率超短脉冲传输[J].中国激光, 2017, 44(2): 157 - 162.
- [12] Frosz M H, Nold J, Welss T, et al. Five-ring hollow-core photonic crystal fiber with 1.8 dB/km loss [J]. Optics

- Letters, 2013, 38(13): 2215 – 2217.
- [13] V W N, D B T, R H J, et al. Low-loss kagome hollow-core fibers operating from the near-to the mid-IR [J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2571 – 2574.
- [14] B B, F G, Y W Y, et al. Millijoule laser pulse delivery for spark ignition through kagome hollow-core fiber [J]. Optics Letters, 2012, 37(9): 1430 – 1432.
- [15] Dumitrache C, Rath J, Yalin A P. High power spark delivery system using hollow core kagome lattice fibers [J]. Materials, 2014, 7(8): 5700 – 5710.
- [16] Florian L, Frédéric G, Julien D, et al. UV 20 W-class single-mode nanosecond pulse delivery using a vacuum-free/ambient air inhibited-coupling hollow-core fiber [J]. Applied Physics B. 2023, 129(7): 116.
- [17] Cui Yulong, Huang Wei, Zhou Zhiyue, et al. Hollow-core fibre end caps for efficient and stable coupling of kilowatt-class continuous lasers [J]. China Laser, 2022, 49(7): 187 – 188. (in Chinese)
- 崔宇龙, 黄威, 周智越, 等. 空芯光纤端帽实现千瓦级连续激光高效稳定耦合 [J]. 中国激光, 2022, 49(7): 187 – 188.
- [18] Lu Wenju, Zhang Xin, Zhu Kuan, et al. Node-free anti-resonant hollow-core fibre 1064 nm high-power picosecond pulse transmission [J]. China Laser, 2022, 49(3): 63 – 69. (in Chinese)
- 鲁文举, 张鑫, 朱宽, 等. 无节点反谐振空芯光纤 1064 nm 高功率皮秒脉冲传输 [J]. 中国激光, 2022, 49(3): 63 – 69.
- [19] Huang L, Wang Y, Zhang Y, et al. High-efficiency 6-hole structure anti-resonant hollow-core fiber 2. 79 μm Cr, Er: YSGG high-energy pulse laser transmission system [J]. Optics and Laser Technology, 2024, 175: 110743.