

利用 Kagome 光纤实现多芯光子晶体光纤的输出合束

周雨竹 黄莉莉 柴路 王清月 胡明列

The beam combination of multi-core photonic crystal fiber by using the Kagome fiber

Zhou Yu-Zhu Huang Li-Li Chai Lu Wang Qing-Yue Hu Ming-Lie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024206 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广义双曲正弦-高斯光束经 gyrator 变换性质和暗空心光束产生

Gyrator transform of generalized sinh-Gaussian beam and generation of dark hollow light beam with vortex

物理学报.2014, 63(10): 104210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104210>

光束通量空间分布随机变化的统计分析

Statistical analysis of shot-to-shot variation of laser fluence spatial distribution

物理学报.2014, 63(7): 074204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074204>

多子光束相干发射小目标探测研究

Coherent emitting of multiple sub-beams for small target detection

物理学报.2014, 63(3): 034203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034203>

赫兹型微裂纹光场调制增强作用的系统研究

Systematic studies on the field enhancement effect of Hertzian microcracks

物理学报.2013, 62(23): 234203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234203>

形状与位置对断点划痕场分布的影响研究

The effects of shape and position on field distribution of discontinuous crack

物理学报.2012, 61(16): 164207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164207>

# 利用 Kagome 光纤实现多芯光子晶体光纤的输出合束\*

周雨竹 黄莉莉 柴路 王清月 胡明列†

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2015年8月16日收到; 2015年10月9日收到修改稿)

多芯光纤的输出光束只能在远场和焦点附近实现良好的同相位超模合束, 这种超模传输特性大大影响了多芯光纤的应用范围. 一种新型中空 Kagome 光纤为解决这一难题提供了可行的方案, 利用中空 Kagome 光纤可以实现七芯光纤输出模式的整形合束. 本文利用中心波长 800 nm 的钛宝石飞秒激光作为激光源, 耦合入七芯非线性光子晶体光纤, 得到 700 nm 至 1050 nm 的展宽光谱, 并实现同相位超模输出. 随后, 将非线性展宽之后的宽谱七芯光束耦合至 Kagome 光子晶体光纤中, 从 Kagome 光纤输出光斑呈高斯分布的模式传输, 不再演变回七芯模式, 耦合效率 71%. 实验还进一步验证此方法适用于不同结构的多芯光纤, 为多芯光纤在高功率激光等领域的应用提供了参考.

**关键词:** 多芯光子晶体光纤, Kagome 光纤, 相干合束

**PACS:** 42.60.Jf, 42.81.Qb, 42.55.Tv

**DOI:** 10.7498/aps.65.024206

## 1 引言

光子晶体光纤 (PCF) 一经问世, 便引起了光学界的广泛关注. 其特性显著, 有着极大的设计自由度和色散, 可以提供合适的零色散波长; 较小的模场面积和较长的传输距离可以提供极大增强的非线性效应积累<sup>[1]</sup>. 所以选择 PCF 作为产生超连续光谱的非线性介质, 有着特殊的优势<sup>[1-4]</sup>. 超连续光谱<sup>[5]</sup>是指高能量的脉冲在非线性介质中传输而引起的光谱上的展宽<sup>[6]</sup>, 在光谱学、脉冲压缩、可调谐超快激光源和光学频率梳等众多领域中, 都有着极为重要的应用. 目前, 关于如何将抽运激光高效率的耦合入 PCF 已十分成熟, 但在功率提升方面仍面临挑战. 主要是由于普通 PCF 的模场面积较小, 无法承受高强度的入射光源, 且热效应及激光损伤等因素限制了入射光源功率. 由此, 研究者进一步提出了应用多芯光子晶体光纤来产生超连

续光谱. 多芯光子晶体光纤能有效提高模场面积, 可以承受更高的损伤阈值, 同时多芯分散热效应能量, 通过调整其结构特性, 可以实现超连续谱的高功率输出<sup>[7,8]</sup>. 2012年, 方晓慧等<sup>[8]</sup>成功实现在七芯光纤中产生超过一个倍频程的超连续光谱, 且实验光纤长度达 20 m 时, 输出光斑可呈同相位超模输出. 紧接着 2014 年, 湛鸿伟等<sup>[9]</sup>采用平均功率为 141.6 W 的皮秒光纤激光抽运一段国产七芯光子晶体光纤, 获得了平均功率为 104.2 W、连续光谱覆盖范围从 750 至 1700 nm 以上的超连续谱输出, 成功实现多芯光纤的百瓦量级超连续谱输出. 在保证高功率输出的同时, 研究者们同时关注输出光束质量和传输稳定性. 光场在多芯光子晶体光纤的各纤芯中传输, 根据耦合模理论, 七芯光纤中可同时传输七个本征超模<sup>[10,11]</sup>, 但只有同相位超模可以实现远场呈高斯光斑输出且具有衍射极限. 通过对光纤内部结构以及掺杂程度的设计<sup>[12,13]</sup>, 可以有效选择多芯光纤的输出模式.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61322502, 61535009, 1127423) 和教育部长江学者创新团队 (批准号: IRT13033) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: huminglie@tju.edu.cn

但是在实际应用中,多芯光纤的输出光束仍然存在使用上的限制.利用透镜将其输出光斑准直聚焦时,光束在透镜焦点附近呈基模高斯分布,继续传输过程中光束会再次演化为七芯分布,无法保持基模高斯分布.2014年,研究者提出通过塌陷多芯光纤尾端的方式,实现输出模式为稳定的高斯分布[14].

本文提出一种新方式,即利用Kagome光子晶体光纤[15]对七芯光纤输出光斑进行模式整形,将七芯光纤的输出光斑耦合至Kagome光纤中,光场在Kagome光纤中重新耦合,实现高斯分布模式输出.在800 nm的钛宝石飞秒激光器抽运下,七芯非线性光子晶体光纤中光谱展宽至700—1050 nm.在实现同相位超模运转下再将其耦合至Kagome光纤,合束后的Kagome模式在传输中保持良好高斯分布,不再演变为七芯光束.此外,对不同结构的七芯光子晶体光纤的合束实验,证明了本实验方法可适用于不同结构的多芯光纤.

## 2 实验装置

实验使用的飞秒激光光源为Ti:sapphire锁模激光器,激光器输出的脉冲脉宽为35 fs,重复频率为100 MHz,中心波长810 nm,谱宽30 nm,最高输出功率700 mW.实验装置图如下图1所示.HWP为宽带半波片,可以改变入射光的偏振状态,从而影响耦合效果.L1为非球面透镜(EFL = 18.40, NA = 0.15)可以使激光器的输出光以高效率耦合进七芯高非线性光子晶体光纤.实验选择的耦合平台为高精度的自由空间光纤耦合器,同意通过精细调整来提高耦合效率.

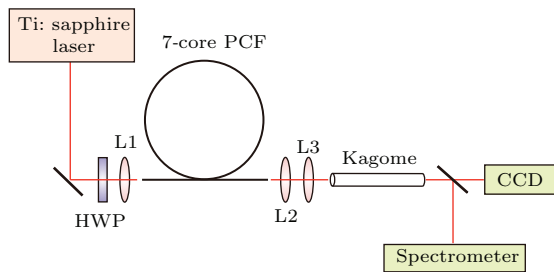


图1 七芯高非线性光子晶体光纤模式整形装置图,图中HWP表示宽带半波片

Fig. 1. Experimental setup typically used for beam combination of multi-core PCF.

实验选用了两根不同结构的七芯光子晶体光纤进行合束研究,光纤均由天津大学超快激光实

验室设计,武汉大学光电国家重点实验室控制.图2为两种光纤的扫描电镜图,其详细结构参数如表1所示.表中光纤的空气填充比定义为光纤的空气孔直径 $d$ 与空气孔间距 $\Lambda$ 之比,光纤的非线性特性随 $d/\Lambda$ 的值变大而变强.

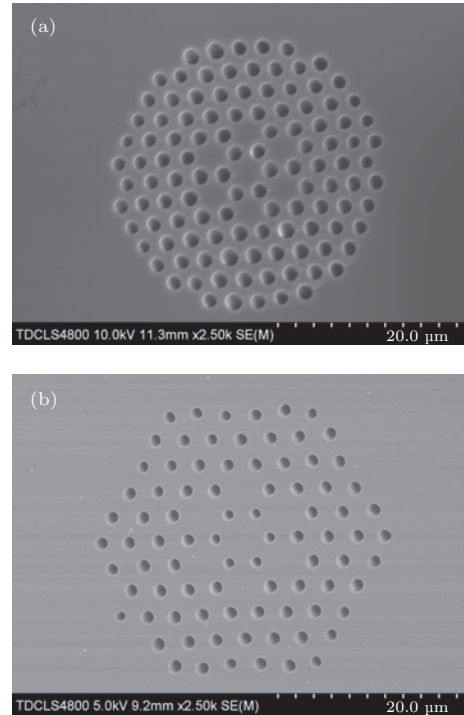


图2 七芯高非线性光子晶体光纤 (a) PCF1的端面电子显微扫描图; (b) PCF2的端面电子显微扫描图

Fig. 2. Seven-core nonlinear PCF: (a) Scanning electron microscope image of the cross-section of PCF1; (b) scanning electron microscope image of the cross-section of PCF2.

表1 七芯光纤参数

Table 1. Parameters of two kinds of PCFs.

参数	PCF1	PCF2
纤芯直径/ $\mu\text{m}$	3.4	4.99
空气孔直径 $d/\mu\text{m}$	1.6	内层: 1.09; 外层: 1.25
空气孔间距 $\Lambda/\mu\text{m}$	2.7	3.58
空气填充比 $d/\Lambda$	0.593	0.349

装置中非球面镜L2 (EFL = 13.86, NA = 0.18)作为输出准直镜,可以得到清晰的输出七芯光斑.L3为Kagome PCF的输入耦合镜,为了控制入射光斑大小以及入射发散角度,在反复优化后,选择了 $f = 75 \text{ mm}$ 透镜.由于Kagome PCF的对耦合的角度及位置要求比较严格,特别选用了高精度光纤专用三维位移台(NFP-5561),并使用长铜柱夹持光纤,有效避免夹持应力对光纤产生的影响,提高输出光斑的质量.

Kagome 光子晶体光纤是指包层为 Kagome 结构的中空光子晶体光纤<sup>[15]</sup>, Kagome 这一词来自于日本的竹篮编制结构. 关于 Kagome PCF 的导光机理, 目前还未有定论. 有学者提出反谐振的理论, 即石英壁充当反谐振光波导, 将光信号限制于光纤内<sup>[16]</sup>. 这种光纤不具有完整的光子带隙区, 不依赖光子带隙导光, 可以实现低损耗传输较宽光谱的光, 能满足在长波导光或宽带导光的应用, 并且其大模场面积的中空纤芯, 可支持高斯基模输出,<sup>[16-19]</sup> 非常适合本实验的合束要求.

同相位超模耦合到 Kagome 光纤中实现合束的原理是利用 Kagome 光纤的高斯分布模式. 非线性多芯光纤输出的七芯光斑是同相位的, 经过透镜之后入射到 Kagome 光纤表面的模式是高斯分布, 而 Kagome 光纤本身基模分布是高斯分布, 因而能够激发 Kagome 光纤中的基模分布, 达到合束目的.

实验中使用的 Kagome PCF 的端面扫描电镜图如图 3(a) 所示, 由 GLO photonics 公司制作, 该

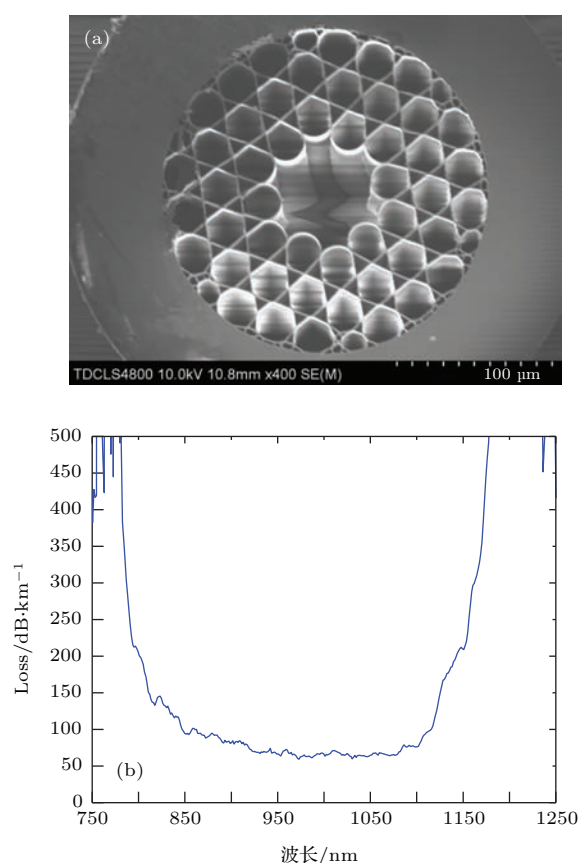


图3 Kagome PCF 的 (a) 端面扫描电镜图, (b) 低损耗曲线  
Fig. 3. Kagome PCF: (a) Scanning electron microscope image of the cross-section; (b) attenuation spectra for Kagome fiber.

光纤为缺失七孔的内摆线型 Kagome 光纤, 其外径为 350 μm, 模场直径为 47 μm, 空气间距为 20 μm, 支撑壁厚度为 320 nm, 其低损耗窗口为 800 nm 到 1150 nm, 其损耗曲线如图 3(b) 所示, 实验中 Kagome 光纤的长度为 10 cm. Kagome PCF 的输出光束耦合入光谱分析仪 (ANDO6315A) 和光束质量分析仪中, 分别测量光谱及光束近场和远场模式. 在实验中, 我们选取实验长度为 10 cm. 长的 Kagome 光纤依然可以实现合束, 但传输损耗会影响合束的效率.

### 3 实验结果及其分析

为了实现较宽光谱的同相位超模传输, 首先进行了七芯非线性光子晶体光纤的非线性展宽. 实验的七芯光纤为 PCF1, 长度为 15 m, 光纤头部使用裸纤适配器夹持. Ti:sapphire 激光器输出功率 550 mW, 光斑呈基模, 耦合至 PCF1, 入射耦合效率为 19%, 产生超连续光谱. PCF1 输出光束经过非球面透镜准直后, 经耦合透镜耦合至 Kagome PCF 中. 从 PCF1 的直接输出光束经过非球面透镜准直后, 输出光束质量见图 4(a) 为近场图像, (b) 为远场图像. 通过观察光束质量图可知, 光斑在远场呈现较好的高斯基模状态, 近场图像表明光束在七个芯内传输强度较为均匀. 但光束在准直透镜的焦点后继续传输过程会发生演化, 又恢复成七芯模式, 不能保持高斯状态.

而经过 Kagome PCF 后的结果则完全不同, 图 4(c) 和 (d) 分别为 Kagome PCF 的输出光束场分布, (c) 为近场图样, (d) 为远场图样. 这是由于七芯光束在通过 Kagome PCF 时, 光束在纤芯内部再次耦合, 形成可以稳定传输的高斯分布模式. Kagome PCF 对于耦合要求非常精确, 任何角度以及位置的偏差会导致模式改变, 出现表面模与纤芯基模之间的反向耦合效应, 使得输出模式质量下降. 反复优化入射 Kagome PCF 前的透镜组, 选择最佳的入射光斑大小以及光束发散角, 同时在保证输出基模情况下, 获得最大耦合效率. Kagome PCF 长度为 10 cm, 耦合效率最高可达到 71%. 合束后, Kagome 输出近场和远场光斑都呈高斯分布的模式传输, 且在传输过程中不再演化为七芯模式, 可以保持稳定的 Kagome 光束. 光谱数据如图 5 所示, 实线为 PCF1 的输出超连续光谱,



虚线为Kagome PCF的输出光谱, 数据经过归一化处理. 超连续光谱覆盖范围从700 nm至1025 nm, Kagome光纤低损耗窗口为800至1150 nm, 低损耗窗口与传输光谱范围基本符合.

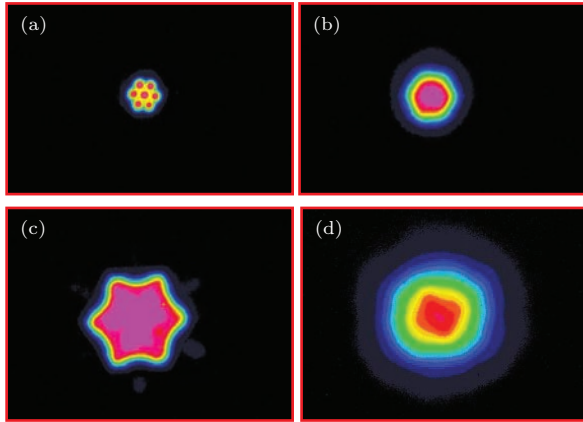


图4 (网刊彩色) 光束质量分析图 (a) PCF1输出光束近场图像; (b) PCF1输出光束远场图像; (c) Kagome PCF输出光束近场图样; (d) Kagome PCF输出光束远场图样

Fig. 4. (color online) Beam profiles measured with beam analyzer: (a) Near-field of PCF1; (b) far-field of PCF1; (c) near-field of Kagome PCF; (d) far-field of Kagome PCF.

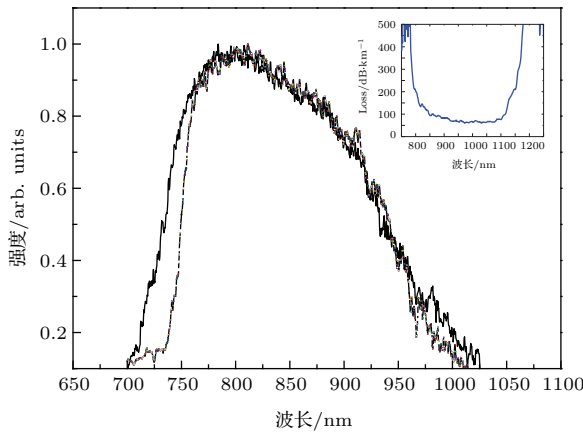


图5 Kagome PCF输出光谱与PCF1输出光谱对比图; 内插图Kagome PCF的低损耗曲线

Fig. 5. Comparison spectrum of output for Kagome PCF(dash) and PCF1(solid); internal graph is the attenuation of Kagome PCF.

对另一种PCF2进行了相同的实验, 在产生超连续光谱后, 同样利用Kagome PCF对PCF2的输出光束进行空间合束, 耦合效率更高达80%, Kagome PCF输出光斑可保持Kagome模式传输, 光谱基本无成分损失. 图6为PCF2的空间合束演变过程, 七芯光纤输出近场图样为均匀清晰的七芯光斑(图6(a)), 远场为高斯基模(图6(b)), 经透

镜准直后, 光斑会演化为七芯状态. 耦合入射至Kagome光纤后, 七芯光斑耦合为Kagome模式, 呈高斯分布模式输出(图6(c)和(d)), 不再演化为七芯状态. 图7为PCF2的光谱数据图, 实线为PCF2输出的超连续光谱, 虚线为Kagome光纤的传输光谱. 两曲线高度重叠, 且PCF2的展宽范围更好的符合Kagome PCF的低损耗窗口, PCF2相比于PCF1拥有更高的合束耦合效率.

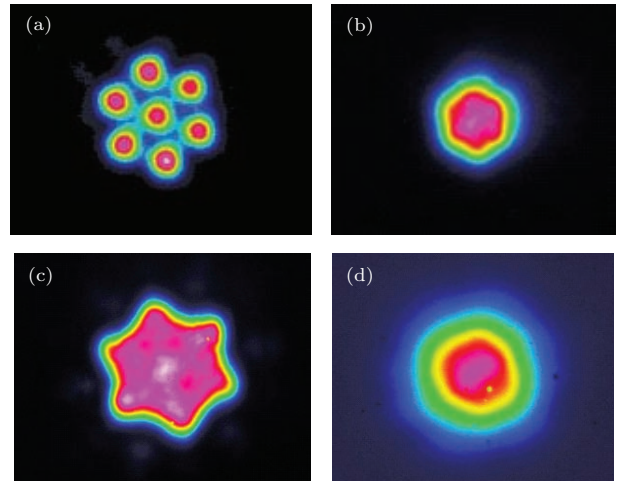


图6 (网刊彩色) 光束质量分析图 (a) PCF2输出光束近场图像; (b) PCF2输出光束远场图像; (c) Kagome PCF输出光束近场图样; (d) Kagome PCF输出光束远场图样.

Fig. 6. (color online) Beam profiles measured with beam analyzer: (a) Near-field of PCF1; (b) far-field of PCF1; (c) near-field of Kagome PCF; (d) far-field of Kagome PCF.

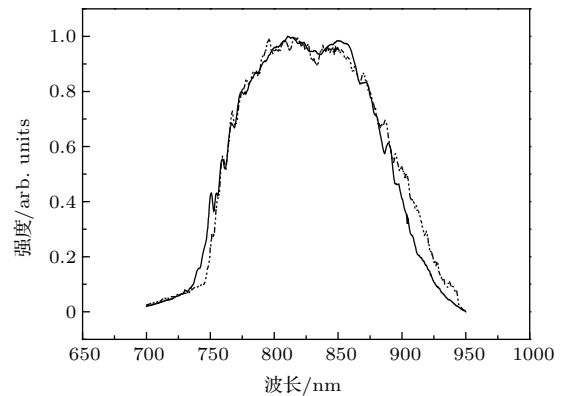


图7 Kagome PCF输出光谱与PCF2输出光谱对比图 Fig. 7. Comparison spectrum of output for Kagome PCF(dash) and PCF2(solid).

### 4 结 论

成功实现了基于Kagome PCF对两种不同结构的七芯非线性光子晶体光纤输出光斑的空间合

束. 主要是基于 Kagome PCF 的低损耗和宽通频带特性, 纤芯为大模场中空设计, 同时支持高斯基模输出. 实验得到 Kagome PCF 的合束效率达到 71%, 且可适应于宽谱传输, 光谱覆盖范围从 700 nm 至 1050 nm, 输出光斑模式良好, 光斑在传输过程中保持稳定模式状态, 呈高斯分布, 不再演化为七芯光斑. 此种方法可广泛应用于多芯光纤的不同发展领域中, 如基于多芯光纤的激光器、放大器等. 但由于 Kagome PCF 对于耦合要求较为精确, 调节要求较高, 在简便性上仍有待改善. 综上, 此方法可行, 传输效率较高, 因此有很大的应用前景, 也为多芯光纤的在各领域的发展带来更大的空间.

### 参考文献

- [1] Wang Q Y, Hu M L, Chai L 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 57 (in Chinese) [王清月, 胡明列, 柴路 2006 中国激光 **33** 57]
- [2] Fang X H, Wang Q Y, Liu J J, Liu B W, Li Y F, Chai L, Hu M L 2010 *Chin. J. Lasers* **6** 1585 (in Chinese) [方晓惠, 王清月, 刘俊杰, 刘博文, 栗岩锋, 柴路, 胡明列 2010 中国激光 **6** 1585]
- [3] Chen H W, Jin A J, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 084205
- [4] Song R, Hou J, Chen S P, Yang W Q, Lu Q S 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094211
- [5] Dudley J M, Genty G, Coen S 2006 *Mod. Phys. Rev.* **78** 1135
- [6] Liu W H, Song X Z, Wang Q S, Liu H J, Zhao W, Liu X M, Peng Q J, Xu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 917 (in Chinese) [刘卫华, 宋啸中, 王屹山, 刘红军, 赵卫, 刘雪明, 彭钦军, 许祖彦 2008 物理学报 **57** 917]
- [7] Wragge M, Glas P, Fischer D, Leitner M, Vysotsky D V, Napartovich A P 2000 *Opt. Lett.* **25** 1436
- [8] Fang X H, Hu M L, Huang L L, Chai L, Dai N L, Li J Y, Tashchilina A Y, Zheltikov A M, Wang C Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 2292
- [9] Chen H W, Wei H F, Liu T, Zhou X F, Li J, Tong W J, Chen Z L, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044205 (in Chinese) [湛鸿伟, 韦会峰, 刘通, 周旋风, 李江, 童维军, 陈子伦, 陈胜平, 侯静, 陆启生 2014 物理学报 **63** 044205]
- [10] Fang X H 2010 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [方晓惠 2010 博士学位论文天津: 天津大学]
- [11] Hu M L, Wang Q Y 2013 *The 10th National Conference on Optoelectronic Technology* Beijing, China 2012, 12th June, p49 (in Chinese) [胡明列, 王清月 2013 第 10 届全国光电技术学术交流会 中国北京, 2012 年 6 月 12 日 p49]
- [12] Huang L L, Fang X H, Cui Y L, Hu M L, Wang Q Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014204 (in Chinese) [黄莉莉, 方晓惠, 崔元玲, 胡明列, 王清月 2014 物理学报 **63** 014204]
- [13] Bo L, Zhou G Y, Xia C M, Liu H Z, Hou Z Y 2014 *Opt. Eng.* **53** 688
- [14] Zhou X F, Chen Z L, Zhou H, Hou J 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 3970
- [15] Couny F, Benabid F, Light P S 2006 *Opt. Lett.* **31** 3574
- [16] Wang Y Y, Wheeler N V, Couny F, Roberts P J, Benabid F 2011 *Opt. Lett.* **36** 669
- [17] Shen H 2013 *M. S. Dissertation* (Tianjin: Nankai University) (in Chinese) [沈贺 2013 硕士学位论文天津: 南开大学]
- [18] Russell P St J, Hölzer P, Chang W, Abdolvand A, Travers J C 2014 *Nature Photon.* **8** 278
- [19] Jiang W X, Tan X L, Zhou J 2011 *High Power Laser Part. Beams* **23** 2578 (in Chinese) [蒋文晓, 谭晓玲, 周骏 2011 强激光与粒子束 **23** 2578]

# The beam combination of multi-core photonic crystal fiber by using the Kagome fiber\*

Zhou Yu-Zhu Huang Li-Li Chai Lu Wang Qing-Yue Hu Ming-Lie<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

( Received 16 August 2015; revised manuscript received 9 October 2015 )

## Abstract

Using multi-core photonic crystal fiber (PCF) has advantages of large-mode-area that can support high beam intensity and disperse heat. However, only when the beam profile in far-field and the focal point of in-phase super mode is Gaussian-shaped, the energy can be more concentrated as compared with other shapes. And this beam profile feature limits the applications of multi-core PCF.

With the development of optics, there is a practical solution to improve the beam profile of multi-core PCF in which a Kagome fiber is used. This solution is to couple the in-phase super mode source (obtained from multi-core PCF) into Kagome fiber to achieve the beam combination of multi-core photonic crystal fiber, i. e. the beam profile remains to be Gaussian-shaped at any location in the optical field. The Kagome fibers have a novel hollow structure and thus will show some new properties, such as broad optical transmission bands with relatively low loss, no detectable surface modes, and high confinement of light at the core, and these features are suitable for beam combination.

In this paper, a Ti:sapphire femtosecond pulsed fiber oscillator, with its center wavelength of 800 nm and output power of 550 mW, is used to pump a piece of seven-core nonlinear PCF, with an efficiency of 19%. EFL of the coupling lens is 18.40 mm and the  $NA$  is 0.15. Then the in-phase super mode source can be obtained from the 15 m multi-core PCF, with a broadband spectrum from 700 to 1050 nm. The beam profile of far field and the focal point of in-phase super mode is Gaussian-shaped and there is a seven-core-shaped pattern at nearfield and other locations in the optical field. In order to combine the beams of multi-core fiber, the in-phase super mode source is coupled into a piece of Kagome fiber, 10 cm long, by using the coupling lens whose EFL is 13.86 mm. Its coupling efficiency is 71% and the output beam profile remains to be Gaussian-shaped at any locations in the optical field; this means that there is no seven-core-shaped pattern. It also transmits broadband spectrum with low loss. Moreover, this experiment also proves that the solution can be used for different multi-core PCFs and can have a higher coupling efficiency, 80%. Thus a reference can be given for high power applications of multi-core PCF, and inspiration may be given to some other frontier fields in fiber optics.

**Keywords:** multi-core photonic crystal fiber, Kagome fiber, coherent beam combination

**PACS:** 42.60.Jf, 42.81.Qb, 42.55.Tv

**DOI:** 10.7498/aps.65.024206

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61322502, 61535009, 11274239) and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in Universities, China (Grant No. IRT13033).

† Corresponding author. E-mail: [huminglie@tju.edu.cn](mailto:huminglie@tju.edu.cn)