

多芯光子晶体光纤的相干组束集成

陈月娥^{1,2}, 邵秋峰³, 王金生⁴

- (1. 燕山大学 理学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 吉林省隆化测控设备制造有限公司, 吉林 长春 130117;
3. 装甲兵工程学院, 北京 100039; 4. 燕山大学 继续教育学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 高功率光纤激光器的广泛应用前景使其成为固体激光器的研究新热点, 但是由于受到受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)的影响, 严重限制了单根光纤的最大输出功率, 与此同时随着输出功率的增加带来了光束质量变差的问题。光纤激光并联组束的方法因其光束质量差, 也在其应用上受到诸多限制, 而基于倏逝波耦合的多路激光束相干叠加实现的相干组束技术则能使输出功率得以提高的同时保证好的光束质量。基于上述的问题, 文中设计出解决方案并理论计算对比了一芯、三芯、七芯的光子晶体光纤光强分布情况, 证明集成式多芯光子晶体光纤可以很好地实现相干组束输出, 这为实现光纤激光器高功率和高光束质量输出提供新的可能途径。

关键词: 光子晶体光纤; 相干组束; 高功率; 倏逝波

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1454-04

Coherent beam combination of integrated photonic crystal fiber

Chen Yue'e^{1,2}, Shao Qiufeng³, Wang Jinsheng⁴

- (1. College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. Jilin L&H Measure and Control Equipment Co., LTD., Changchun 130117, China;
3. Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100039, China;
4. College of Continuous Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The wide application of high power fiber laser makes it become a new hotspot in the research of solid state laser. But due to stimulated Raman scattering(SRS) and stimulated Brillouin scattering(SBS) effect, the maximum output power of single fiber is limited, and beam quality becomes worse with the increase of power variation. Method of parallel beam combining of fiber laser because of its poor beams, so that its application is restricted, and coherent beam combination technology can make multiple laser beam coherent superposition, so that the output power can be improved while ensuring good beam quality. In this paper, the design and theoretical calculation of one core, three core, seven core photonic crystal fiber light distribution were conducted, proving that integrated photonic crystal fiber can be very good to achieve coherent beam output, while achieving a high output power and high beam quality of fiber laser.

Key words: photonic crystal fiber; coherent beam; high power; evanescent wave

收稿日期: 2013-09-05; 修订日期: 2013-10-11

基金项目: 河北省自然科学基金(F2013203086); 吉林省自然科学基金(20140520102JH)

作者简介: 陈月娥(1978-), 女, 讲师, 博士, 主要从事高功率光子晶体光纤激光器的研究。Email:552001140@qq.com

0 引言

所谓光纤激光器就是利用掺杂光纤作为增益介质的激光器。早在 20 世纪 60 年代,美国光学公司的 E.Snilzer 等人就已经提出了掺稀土元素光纤激光器和放大器的构想^[1]。20 世纪 70 年代以来,随着光纤制备技术以及谐振腔结构的改进,光纤激光器有了很大的发展,特别是 20 世纪 80 年代,激光二极管泵浦技术的发展和双包层结构光纤的提出^[2]。20 世纪末宝利来公司的研究人员采用双包层技术,在实验室获得 100 W 的激光输出,使得光纤激光器的实用化进入实际阶段。2003 年 6 月,美国 IPG 公司展示出一台波长 1.1 μm ,功率为 10 千瓦量级的高功率激光器。目前,高功率光纤激光器已经在光通信、材料加工与处理、医学、印刷等领域有所应用并具有更广泛的前景^[3],并逐步代替传统的高功率激光器(YAG 激光器、二氧化碳激光器)。

但是,由于受到受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)的影响,限制了单根光纤的最大输出功率,与此同时随着功率的增加带来了光束质量变差的问题^[4]。虽然光纤激光并联组束的方法可获得高激光功率,且比常规固体或气体激光有优势,但因其光束质量差,使其应用也受到限制。光束质量变差的主要原因在于,多个并联光纤激光是非相干的^[5]。而基于倏逝波耦合的多路激光束相干叠加实现的相干组束技术则能使输出功率得以提高,同时保证好的光束质量,因此,研究光纤激光的组合相干叠加技术,以获得千瓦级以上的相干激光输出,这对高能光纤激光武器的发展是非常有益的。而多芯光子晶体光纤将开辟激光相干合成的新途径。文中设计并理论计算对比了一芯、三芯、七芯的光强分布情况,对上述的多芯光子晶体光纤应用二次拉丝的方法进行了实验制备和测试。通过对比理论和实验结果证明集成式多芯光子晶体光纤可以很好地实现相干组束输出。

1 理论设计

设计的一芯光子晶体光纤结构端面如图 1 所示。这是一个双包层大模面积光子晶体光纤,其中光纤的内包层空气孔直径 $d=4.51 \mu\text{m}$, $\Lambda=6.77 \mu\text{m}$,纤芯的直径为 $14.12 \mu\text{m}$ 。

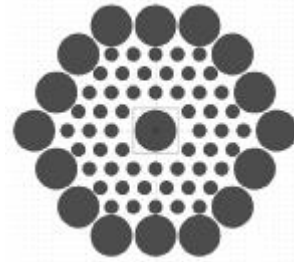


图 1 一芯光子晶体光纤的横截面图

Fig.1 Cross section of one core photonic crystal fiber

设计的三芯光子晶体光纤结构端面如图 2 所示。所有的空气孔以三角形结构排列,相邻空气孔的间距为 Λ 。x 轴方向上排列着三个具有双折射特性的纤芯,纤芯的上下方均为大空气孔,直径为 d_1 ,左右方均为小空气孔,直径为 d_2 ,其余空气孔直径均为 d ,因此三个纤芯都具有双折射特性,并且光纤的快轴方向为 y 方向,慢轴方向为 x 方向。选取结构参数为: $\Lambda=2.5 \mu\text{m}$, $d_1=2 \mu\text{m}$, $d_2=1 \mu\text{m}$, $d=1.6 \mu\text{m}$ 。

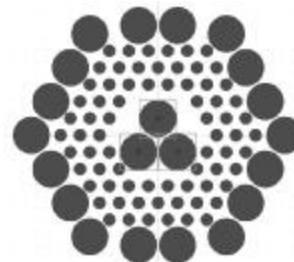


图 2 三芯光子晶体光纤的横截面图

Fig.2 Cross section of three core photonic crystal fiber

在七芯光子晶体光纤中,对纤芯间倏逝波的耦合作用起到决定性的作用的是相位的锁定,所以一方面要增加纤芯面积,另一方面必须保证纤芯间有足够大的耦合强度。文中利用有限差分光束传播法(FD-BPM)和多级法对七芯光子晶体光纤的结构对耦合强度和模场面积的影响进行了分析,这为设计七芯光子晶体光纤的结构和后期实验控制提供理论依据。七芯光子晶体光纤结构端面的设计见图 3。其

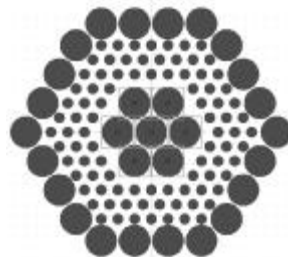


图 3 七芯光子晶体光纤的横截面

Fig.3 Cross section of seven core photonic crystal fiber

中孔间距为 $\Lambda=10\ \mu\text{m}$, 外层空气孔直径为 $3\ \mu\text{m}$, 内层空气孔直径为 $1\ \mu\text{m}$ 。并设定该结构在传输波长为 $1064\ \text{nm}$ 时对应的包层材料折射率为 $n=1.45$ 。

2 RSOF 模拟

对所设计的一芯、三芯和七芯光子晶体光纤横截面的光模场进行模拟, 结果如下列图 4~6 所示。

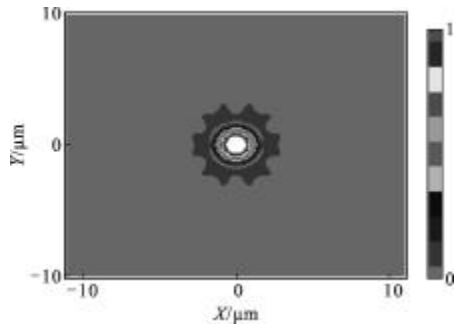


图 4 一芯光子晶体光纤横截面的光模场

Fig.4 Optical mode field of cross section of one core photonic crystal fiber

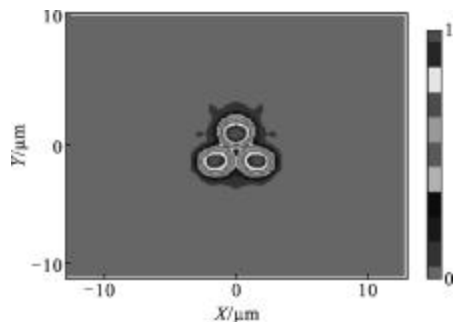


图 5 三芯光子晶体光纤横截面的光模场

Fig.5 Optical mode field of cross section of three core photonic crystal fiber

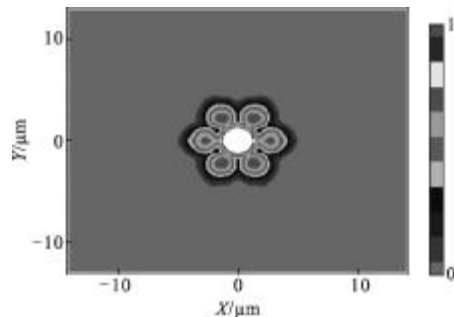


图 6 七芯光子晶体光纤横截面的光模场

Fig.6 Optical mode field of cross section of seven core photonic crystal fiber

从上面三种不同的光子晶体光纤光场模拟结果

可以看出, 光子晶体光纤的结构可以有效的将光能量束缚在芯径中, 其中七芯结构的光场模拟结果显示, 几个芯径中的光束耦合, 使得中间芯径中的光明显增加, 实现了笔者希望看到的相干耦合功率增强的同时保证光束质量的目标。

3 实验制备

采用高温熔融方法, 基于合适的掺杂配方^[6], 用长坩埚熔炼方案得到符合拉丝要求的玻璃棒或玻璃条。冷却后取出掺杂玻璃材料, 在光纤拉丝塔上进行二次烧结, 在拉丝过程中进行了抽真空处理, 气泡排出。样品澄清透明, 无结石和气泡, 如图 7 所示。

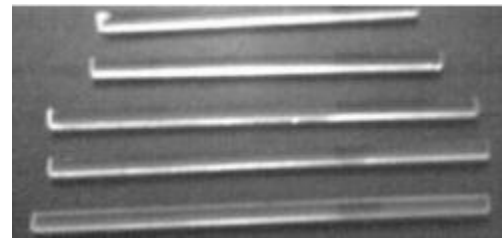


图 7 掺杂棒样品

Fig.7 Sample of doping rod

文中利用堆积法完成掺杂双包层 PCF 的制备, 其具体过程如下: 首先, 利用带有空气孔的石英棒拉制成为所需尺寸的粗细两种毛细管, 之后把毛细管紧密地堆积在套管中, 这样带来的结果是细的毛细管在内部为内包层, 粗的毛细管在外层为外包层, 内部毛细管排列呈三角形结构。其次, 在内部毛细管中心部分引入细毛细管同样径向尺寸的掺杂芯棒。最后将排布好的预制棒放到拉丝机上进行二次拉丝, 样品结构见图 8。经过两次拉制, 预制棒被缩小几十万倍, 得到满足要求的光纤。上述双包层的制备保证了内包层的数值孔

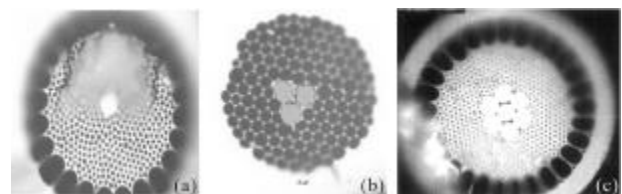


图 8 样品结构图

Fig.8 Structure diagram of sample

径值足够小, 这就带来了在纤芯中传输的光不仅具有很大的模面积同时单模传输, 进而保证了输出的光具有良好的光束质量。上述的设计保证外包层的

数值孔径值很大, 在提高泵浦光的耦合效率同时提高泵浦效率, 这些都是利于制备高功率激光器的主要因素。

4 光纤测试

图 9 为笔者测量 PCF 模场分布的实验装置, 连续 YAG 激光器的输出功率为 91 mW, 工作波长是 532 μm。YAG 激光经透镜耦合进 PCF, 耦合效率可以达到 30%, 在光纤的出射功率为 30 μW 时, 用 CCD 观察到的 PCF 出射光模场如图 9 所示, 为光纤的高阶模。

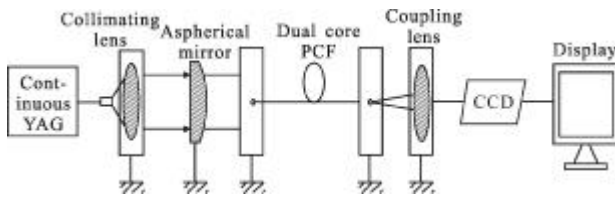


图 9 PCF 远场强度分布测量的示意图

Fig.9 Measurement schematic of PCF far field intensity distribution

经过分光镜的另一路光通过 CCD 成像, 可以得到光纤远场和近场的模场分布图。图 10 所示是用 CCD 观察了光在光纤中传输时的光纤端面图。从图中可以看出光纤的结构很清晰地显现出来, 说明实验中光纤和光学系统耦合得很好, 大部分的光被束缚在纤芯和包层中。

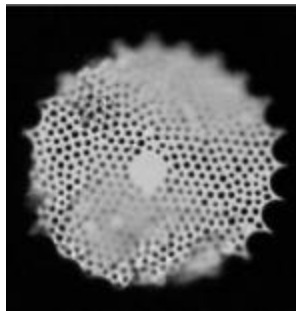
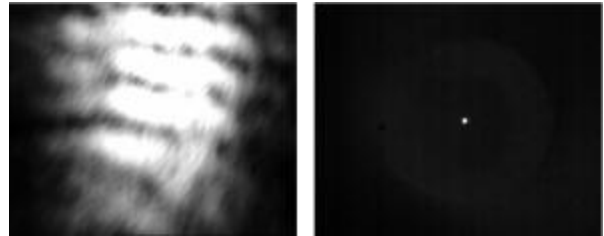


图 10 一芯 PCF 的端面图

Fig.10 One core end surface of PCF

从图 11(a)的 PCF 模场图可以看出 PCF 出射光的模场呈现明显的相干条纹, 即满足频率相同、振动方向相同、相位差恒定的干涉条件。图 11(a)形成的干涉图形中包含着多级的干涉条纹, 为了保证只存在零级干涉条纹, 在三芯光纤的出射端增加一个短焦距的透镜, 调整透镜和光纤端面间的距离, 使出射光经透镜后恰能会聚到焦点处, 在输出功率为 80 μW

时, 得到的模场图如图 11(b)所示, 通过远场图可以明显地看到光束质量和未耦合的单芯相差不大, 但通过功率计测试光强度明显按幂指数增强, 实现了笔者设计的初衷。



(a) PCF 模场的远场分布 (b) 聚焦后的输出模场图
(a) Far field distribution of PCF mode field (b) Output mode field map after focusing

图 11 三芯 PCF 的端面图

Fig.11 Three core end surface of PCF

5 结论

在双包层光子晶体光纤的较大内包层中有直径、掺杂浓度均相同的多个掺杂纤芯, 由于纤芯间的距离很近, 可以保证单模输出。基于振荡激光倏逝波的相干耦合, 使得各纤芯受激发射相互作用, 达到同相位激光输出, 证明集成式多芯光子晶体光纤的设计是可以实现光纤激光器高功率、高光束质量输出的。

参考文献:

- [1] Snmzer E. Optical master action of Nd³⁺ in a barium crown glass[J]. Physical Review Letter, 1961, 7(12): 444-446.
- [2] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double-clad offset core Nd fiber laser [C]//Pro Conf Optical Fiber Sensors, 1998, paper PD5.
- [3] Liu S H. New development of fiber laser[J]. Optics Electronic Technology & Information, 2003, 48(1): 1-8.
- [4] Chen Hongwei, Chen Shengping, Wang Jianhua, et al. 35 W high power all fiber supercontinuum generation in PCF with picosecond MOPA laser [J]. Optics Communications, 2011, 284(23): 5484-5487.
- [5] Yang Haili, Ruan Shuangchen, Yu Yongqin, et al. Erbium-doped photonic crystal fiber laser with 49 mW [J]. Optics Communications, 2010, 283(16): 3176-3179.
- [6] Chen Yue'e, Wang Yong, Qu Peixin. Affection of alkali metals, alkaline earth metals of Yb³⁺ doped silicate laser glass on physical and optical properties [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1738-1743. (in Chinese)