

双芯光子晶体光纤相干合成的研究

王海云¹, 侯蓝田¹, 周桂耀¹, 苑金辉¹, 魏东宾¹, 郑娟娟²

(1. 燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004; 2. 香港科技大学, 中国香港 九龙 999077)

摘要: 光纤激光器相干组束是目前实现高功率光纤激光系统的重要技术途径, 利用本文的方法得到了双包层结构的双芯光子晶体光纤的相干合成输出, 纤芯直径为 $2.05\mu\text{m}$, 空气孔间距 Λ 为 $2.07\mu\text{m}$, 空气孔直径 d 为 $1.44\mu\text{m}$, 测得了明显的相干条纹, 光纤输出达 $30\mu\text{W}$, 这一成果为多芯光子晶体光纤激光器的发展开拓了新的方向。

关键词: 光子晶体光纤激光器; 相干组束; 双芯相干

中图分类号: TN25

文献标识码: A

Two-core Photonic Crystal Fiber Coherent Synthesis Research

WANG Hai-yun¹, HOU Lan-tian¹, ZHOU Gui-yao¹, YUAN Jin-hui¹, WEI Dong-bin¹, ZHENG Juan-juan²

(1. Institute of Infrared Optical Fibers & Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. The Hongkong University of Science and Technology, Kowloon, Hongkong 999077, China)

Abstract: The coherent group is realized as the important way of the high-power optical fiber laser. The twin-core photonic crystal fiber coherent output was obtained, the core diameter is $2.05\mu\text{m}$, a hole-to-hole spacing is $2.07\mu\text{m}$, the airhole diameter is $1.44\mu\text{m}$, output power up to $30\mu\text{W}$. This achievement will be to a new direction for the fiber lasers.

Key words: photonic crystal fiber laser; coherence; two-core coherence

1 引言

光子晶体光纤^[1] (photonic crystal fibers, PCFs) 具有传统光纤无法比拟的优越特性, 如奇异的色散特性、无休止的单模特性、超大尺寸的模场面积、高非线性等^[2]。基于这些特性, 人们研究出了许多 PCF 相关的各种光学装置, 如零色散光纤、基于 PCF 的模耦合装置等, 而且 PCFs 的独特性, 也更决定了它在激光器领域的发展潜力。

目前的高功率光纤激光器大都利用相干合成技术实现, 中科院研究小组成功地采用共用谐振腔技术实现了两束光纤激光的相干耦合输出, 获得了连续波 18.3W 的锁相光纤激光输出^[3], 国防科学技术大学在国内首次成功采用主振荡并联放大器 (MO-

PA) 方案对三路掺铒光纤放大器进行实时位相探测与校正, 获得了三路连续波瓦级锁相光纤激光的相干输出^[4]。美国的研究部门提出了将多个单模激光器经过布拉格光栅后会聚为一个单一的光束路径的光谱会聚和把多个相位锁定的单模激光器光束相干会聚的方法^[5]。美国加利福尼亚的一个实验室采用 10 路 19 芯掺铒光纤相干输出功率达 200W^[6]。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) (No. 2003CB314905); 国家自然科学基金重点项目 (No. 60637010) 资助的课题。

作者简介: 王海云 (1982 -), 女, 燕山大学信息科学与工程学院在读研究生, 主要从事光子晶体光纤的制备和理论方面的研究。
E-mail: qishi1029@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-11-22; **修订日期:** 2007-12-27

对比这两种技术,主振荡放大器结构需要对每一根光纤进行控制,修正相位及偏振态,系统结构复杂,投入大;自组织相干光纤激光器阵列技术结构简单,而且作为阵列组件的光纤激光器的增益光纤长度、输出功率并不要求严格一致^[7]。本文所阐述的双芯 PCF 的相干合成类似于激光器阵列的自组织相干,而且它比激光器阵列自组织相干对于实验结构要求还要低,因为多芯相干完全在光纤内部完成,避免了外部多个激光器间的耦合,只要制作出结构合理的多芯光纤就可以实现相干,大幅度提高光功率,所以有较大发展前景。

2 理论基础

目前,光纤激光器主要采用掺镱的双包层光纤来作为激光器的增益介质^[8],实现起来比较困难,因此人们开始把目光转向新型的光子晶体光纤 PCFs,把 PCF 作为激光器的增益介质,形成了 PCF 激光器^[9]。通过优化 PCFs 结构,提高泵浦光耦合吸收效率,以及改进泵浦技术等方面来提高输出光的光功率。EPS 目前实验室一般都采用如图 1 所示的 PCF 激光器原理图进行实验。

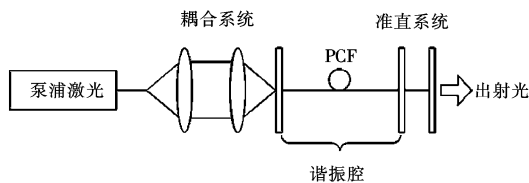


图1 光子晶体光纤激光器原理图

Fig. 1 sketch map of the photonic crystal fiber laser

实验研究常用的光子晶体光纤激光器都是基于单芯双包层的 PCF,再将各个激光器的输出光束进行相干约束来获得高功率,在这些方案中有着很多因素限制着光功率的提高,本文实现了 PCF 两个纤芯之间的相干,得到了明显的相干条纹。

由于双芯 PCF 的特殊结构,它与杨式双缝干涉相类似,这样就可以借用杨式干涉理论对其进行研究。本文所分析的双芯干涉原理图如图 2 所示。

由图可知:光程差 $\Delta = r_2 - r_1$, $r_2 - r_1 = \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2 + r_1}$, 近似情况下, $r_2 + r_1 \approx 2D$, 得到:

$$\Delta = \frac{yd}{D} \quad (1)$$

其中, d 为双缝间距离; D 为双缝与屏之间的距离, 两束光会聚到 P 点的合光强 I 的表达式为:

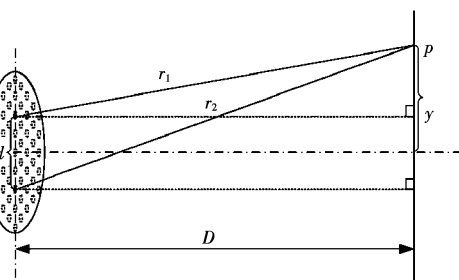


图2 双芯 PCF 干涉原理图

Fig. 2 sketch map of the coherence in two-core PCF

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

其中, I_0 为入射光的光强; $\Delta\varphi$ 是两束光的相位差。相位差与光程差的关系是:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \quad (3)$$

由式(2)、(3)可以得到在光程差等于波长的整数倍时,即:

$$\Delta = \pm k\lambda, (k=0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

时光强最大 $I = 4I_0$, 出现亮条纹, 光程差等于半波长的奇数倍, 即:

$$\Delta = \pm (2k+1) \frac{\lambda}{2} \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

时光强最小 $I = 0$, 出现暗条纹, 可以看出两束光进行干涉得到的最大强度是入射光的 4 倍, 而当用 n 束入射光进行干涉时, 得到的干涉强度是入射光的 2^n 倍。

由式(1)、(2)、(3)可以得到干涉条纹的距离 y 的表达式为:

$$y = \begin{cases} \frac{m\lambda D}{d} & (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \text{ 亮条纹} \\ \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda D}{d} & (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \text{ 暗条纹} \end{cases} \quad (6)$$

两个亮条纹或暗条纹间的距离为条纹间距 f , 表达式为:

$$f = \frac{\lambda D}{d} \quad (7)$$

3 实验结果与分析

本实验的双芯光子晶体光纤截面如图 3 所示, 白色发亮的区域为石英, 黑色圆斑为空气孔。

它的纤芯直径为 $2.05\mu\text{m}$, 空气孔间距 Λ 为 $2.07\mu\text{m}$, 空气孔直径 d 为 $1.44\mu\text{m}$, 试验中选取的光纤长度为 1.6m 。

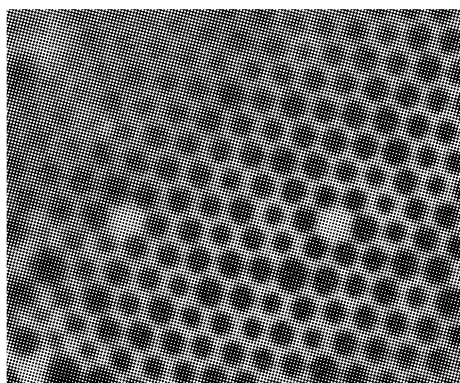


图3 双芯 PCF 端面图

Fig. 3 the two-core PCF made in yan shan university

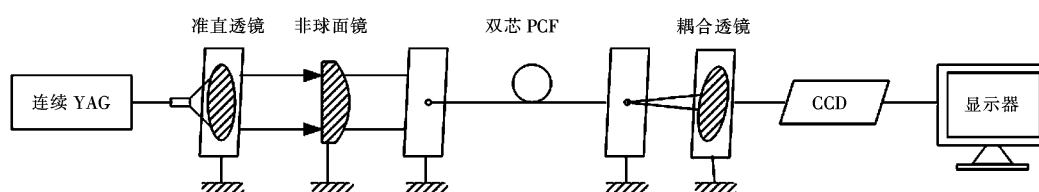


图4 PCF 远场强度分布测量的示意图

Fig. 4 sketch map of the device in far field mode measurement

图4 为我们测量 PCF 模场分布的试验装置,连续 YAG 激光器倍频后的输出功率为 91mW,工作波长是 532nm。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 30μW 时,用 CCD 观察到的 PCF 出射光模场如图 5 所示,为光纤的高阶模。

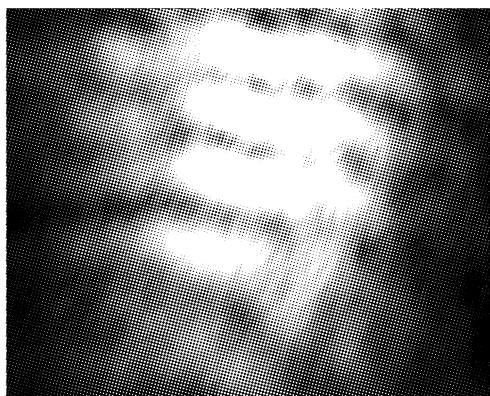


图5 PCF 模场的远场分布

Fig. 5 the mode distributing of PCF from far field

从图 5 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。所以,我们用干涉理论对出射条纹进行分析,根据干涉条纹光强最大满足条件:

$$\frac{yd}{r} = k\lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (8)$$

其中, y 是干涉条纹距离; r 是出射光到探测器的距离; d 是两个纤芯之间的距离; λ 是光波长。在远场强度分布测量的试验中,YAG 激光的波长 1.06μm,由式(7)计算解得的 f 值与试验测得的条纹距离具有较好的一致性。

设光源波长范围为 $\Delta\lambda$,由于波长 λ 与 $(\lambda + \Delta\lambda)$ 内各种波长的干涉条纹非相干叠加,结果仅有零级条纹是完全重合在一起的,其他各级条纹不再重合,极大值位置的范围由式(8)确定,即:

$$\Delta y = k \frac{r}{d} \lambda \quad (9)$$

Δy 称为明条纹宽度。由式(7)、(9)可知,相邻明暗条纹的间距和干涉条纹

宽度随着双芯距离 d 的增大而减小,随着双芯到探测器间距离的增大而增大,随光波长 λ 的增大而增大。

两芯间的距离 d 可以由结构设计的不同而改变, d 的改变将对干涉产生影响。假设 YAG 光源宽度为 b ,当干涉条纹的移动小于条纹间距时仍有相干条纹,满足光的空间相干性,可以以相干孔径角 $\theta = \frac{\lambda}{b}$ 来衡量,在相干孔径角 θ 内的两点是相干的,即:

$$\frac{d}{R} < \frac{\lambda}{b} \quad (10)$$

其中, R 是光源到光纤入射断面的距离,所以要满足相干应满足:

$$d < \frac{\lambda R}{b} \quad (11)$$

光源宽度也要在极限宽度 $b = \frac{\lambda}{\theta}$ 内, b 对干涉图

样有一定的影响,干涉可见度是反映干涉显著程度的,当光源宽度增大时可见度减小,即相干程度下降。同样, d 也不能无条件地减小。激光器对活性介质多次泵浦以增大光功率,光在界面之间来回反射时,界面之间会出现倏逝波,倏逝波是沿横向传播而振幅在竖直方向衰减的指数波。倏逝波穿透包层一段距离后并不向外辐射而是反射回纤芯沿着光纤横向传播,它的存在将对两个纤芯的出射光进行相位振幅的调节。此时就必须考虑距离 d 的大小,合

理地利用倏逝波使光更好的相干,若 d 很小,那么有可能从多芯出射的光耦合到一起也不会发生相干,需要用耦合波理论分析,这将是今后研究多芯光纤激光器的重点。

图5形成的干涉图形中包含着多级的干涉条纹,这是由于双芯的出射光在不同的相位差 $0, \pi, 2\pi, \dots$ 处相干形成的0级,1级,2级……亮条纹,这样形成的多级干涉条纹肯定分散了光的强度,如果光在相干后只有零级条纹,即只有干涉主极大,那么光强就会完全集中,光功率自然提高,这是实现激光器的必然要求。所以在提高泵浦光的入射功率情况下,在双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,这样保证了只存在零级干涉条纹。在输出功率为 $80\mu\text{W}$ 时,得到的模场图如图6所示。

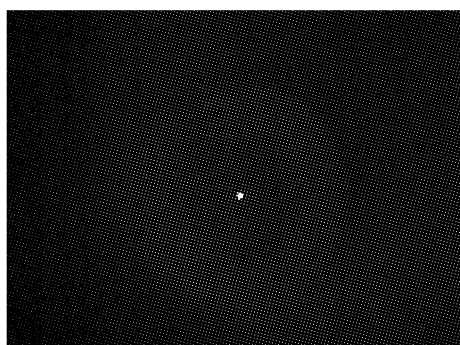


图6 聚焦后的输出模场图

Fig.6 focalizing of the mode distributing

此时,光强实现了最大程度的会聚,大大提高了光功率,用这种光纤作为激光器的增益介质输出功率必然大幅度提高,理想情况下,光功率是单芯出射光功率的平方倍。进一步设想,如果实现多芯 PCF

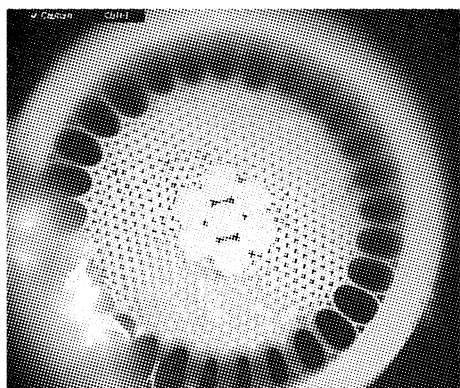


图7 七芯 PCF 端面图

Fig.7 the seven-core PCF made in yan shan university

的相干输出,再把多芯 PCF 集束,当进一步改进泵浦激光系统设计,将会获得千瓦级以上的激光功率输出。本实验室已经拉制出七芯 PCF,端面结构如图7所示,进一步的实验工作正在进行当中,如能实验成功,将是 PCF 激光器发展的新方向。

4 结 论

通过实验得到了双芯 PCF 两个芯之间的相干条纹,打破了以前认为无法实现相干的传统观念,给光子晶体光纤激光器的发展提供了新的发展方向。从本实验的结果出发,就可以制作多芯的 PCF,合理设计光纤的结构,使各个纤芯出射的光束经倏逝波耦合调整相位满足相干条件使其实现相干。把多芯光纤作为激光器的增益介质,光在双包层内多次反射,将大大提高激光器的输出功率,实现几千瓦的大功率输出变得很容易。

参考文献:

- [1] Birks, J C Knight, P St J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 1997, 22(13), 961-963.
- [2] J C Knight, T A Birks, R F Cregan, et al. Large mode area photonic crystal fiber [J]. Electron Lett., 1998, 34:1347-1348.
- [3] 赵帅, 范万德, 盛秋琴. 光纤激光器相干组束技术研究[J]. 激光与红外, 2006, (10): 921-924.
- [4] 肖瑞, 侯静, 姜宗福. 光纤激光器阵列相干合成中的香味探测与校正方法研究[J]. 物理学报, 2006, 55:184-187.
- [5] J C Knight. Towards 100kW fiber laser system scaling up power in fiber laser for beam combing[J]. Crustal Fibre A/S, 2006:134-136.
- [6] Bruesselbach, et al. 200W self-organized coherence in fiber laser array[J]. Optics Letters, 2005, 30:1339.
- [7] 伍波, 刘永智. 高功率光纤激光器相干合成研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, (8): 43.
- [8] W J Wadsworth, J C Knight, W H Reeves, et al. Yb^{3+} -doped photonic crystal fibre laser [J]. Electron. Lett., 2000, 36:1452-1453.
- [9] W J Wadsworth, R M Percival, G Bouwmans, et al. High power air-clad photonic crystal fibre laser[J]. Optics Express, 2003, (11): 48-53.