

双包层多芯光子晶体光纤自相干合成的 数值分析与实验*

韩伟涛^{1)†} 侯蓝田¹⁾²⁾ 耿鹏程¹⁾

1) (燕山大学红外光纤与传感研究所, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2009 年 10 月 30 日收到; 2010 年 1 月 19 日收到修改稿)

依据耦合模理论分析了双包层多芯光子晶体光纤的超模模场特性, 通过倏逝波对 7 束光的相位调节, 可实现相干合成, 激光亮度得到很大提高. 利用相干合成原理对双包层多芯光子晶体光纤的出射光相干功率密度进行了分析与测量, 对此种结构的光子晶体光纤实现自相干合成提出了理论和实验依据.

关键词: 光子晶体光纤, 多芯, 超模, 相干合成

PACC: 4280M, 6185, 4460F

1. 引 言

目前多芯光子晶体光纤(PCF)相干合成的研究逐渐成为热点. 多芯光子晶体光纤的相干合成属于自组织相干合成的一种, 通过耦合模理论计算出合适的纤芯结构, 实现模式选择传输, 使得输出光相干加强. 很多研究机构的相干合成采用大功率光纤激光器集束合成, 合成功率极大加强. 美国 California 大学的一个实验室^[1]采用 10 路 19 芯掺铒光纤作为激光器增益光纤, 通过外部透镜阵列的光束耦合方法达到激光器完全耦合, 激光器相干输出功率达 200 W. 但是这样在相位调制时要求很高, 并且增加了试验的复杂性. 多芯 PCF 能否使每个纤芯同相位输出, 是实现相干合成的重要条件^[2], 多芯 PCF 激光自组织相干受外界影响相对较小, 纤芯间的耦合作用强弱对模式选择起主导作用^[3]. 我们根据耦合模理论^[4], 研究了双包层 7 芯光子晶体光纤传输特性, 利用系统自身组织的位相锁定, 实现同相位输出占主导的方法, 并对远场相干进行了分析, 远场光亮度明显提高, 最终找出了一种可用于自组织相干合成的双包层多芯光子晶体光纤结构.

2. 理论模型

我们设计的双包层 7 芯 PCF 如图 1 所示, 空气孔直径为 $d = 2 \mu\text{m}$, 空气孔间距 $\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.4$. 它的内包层中有六角形排布的 7 个实纤芯, 每个纤芯的直径均为 $D = 18 \mu\text{m}$, 为多芯单模传输^[5] PCF. 如图 1 所示, PCF 的多芯结构增加了纤芯有效面积, 有利于提高入射光耦合效率.

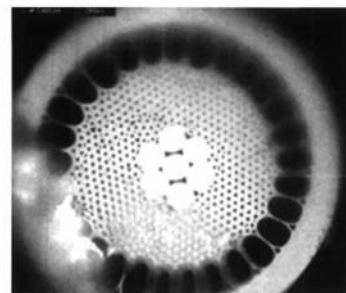
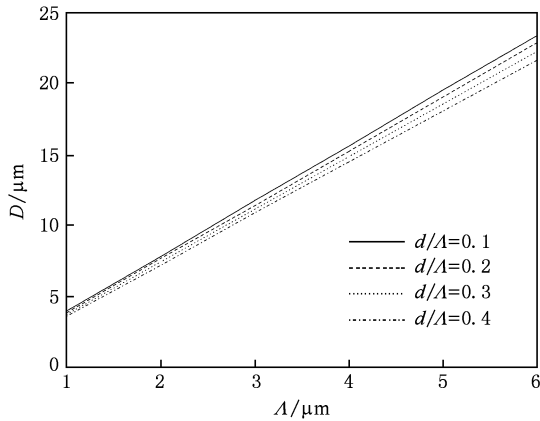


图 1 双包层多芯光子晶体光纤 $d = 2 \mu\text{m}$, $\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.4$

多芯 PCF 各纤芯间的倏逝波相互穿透一段距离后并不向外辐射, 而是在纤芯之间相互作用^[6], 对纤芯的传输光相位有钳制调节作用, 使得各纤芯实现同相位激光相干输出. 纤芯的直径与耦合强度

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 60637010)和河北省自然科学基金(批准号: F2008000867)资助的课题.

† E-mail: hanhan598@hotmail.com

图2 实芯直径 D 与孔间距 Λ 的关系

有直接关系,在保证 $d/\Lambda \leq 0.4$ 的前提下,可以得到实芯直径与空气孔间距 Λ 的关系式

$$D = 4\Lambda - d. \quad (1)$$

当 $d/\Lambda \leq 0.4$ 时,每个纤芯都具有单模特性,当传输某一波长的光时,光子晶体光纤的模场半径将随着孔间距 Λ 的增大而增大.但是 d/Λ 越小,就要求包层空气孔的直径越小,缩小包层与纤芯的折射率差,同时 PCF 的损耗也会快速增大^[7].为得到较大的输出模场且损耗不剧增,应使 d/Λ 尽可能接近于 0.4.所以我们取 $d/\Lambda = 0.4$,空气孔直径为 $d = 2 \mu\text{m}$,空气孔间距为 $\Lambda = 5 \mu\text{m}$,则 $D = 18 \mu\text{m}$.

由于纤芯间的倏逝波穿透深度约为一个波长,远小于纤芯半径,所以邻近各纤芯电磁场耦合作用^[8]远大于非邻近纤芯耦合作用.假设相邻的纤芯之间发生耦合,则根据耦合模理论,不同纤芯之间的耦合关系可以用如下耦合方程^[4]描述:

$$\frac{dA_m}{dz} = - \sum_{n=1}^N K_{mn} A_n \quad (m, n = 1, 2, \dots, N), \quad (2)$$

其中 A_m 为耦合系统中第 m 个模的幅度, K_{mn} ($m \neq n$) 为互耦合系数,且 $K_{mn} = i\beta_m$, β_m 为模式 m 的相位常数.方程组(2)的矩阵形式为

$$\frac{d\mathbf{A}}{dz} = -\mathbf{K}\mathbf{A}, \quad (3)$$

其中 \mathbf{A} 为列矩阵, \mathbf{K} 为耦合系数方阵.设一束光在 z 方向的矢量

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{E}(0) \exp(-i\beta z), \quad (4)$$

其中 β 是行波的相位常数.则由(3)和(4)式得

$$(\mathbf{K} - i\beta\mathbf{I})\mathbf{E}(z) = 0, \quad (5)$$

其中 \mathbf{I} 是大小为 7×7 的单位矩阵, \mathbf{K} 为(3)式描述的 7×7 的耦合系数方阵.为使(5)式有解,则

$$\mathbf{K} - i\beta\mathbf{I} = 0. \quad (6)$$

假设多芯光纤各纤芯参量完全一样,纤芯之间的距离相同,且只考虑相邻纤芯之间的耦合,则在近似条件下(6)式中的相位常数满足

$$\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_7 = \beta, \quad (7)$$

其中所有的互耦合系数取值均为 $K_{mn} = -K_{mn}^* = ik$,代入(6)式,可解得 7 个本征值为: $i(\beta - 2k)$, $i(\beta - k)$, $i(\beta - k)$, $i(\beta + k)$, $i(\beta + k)$, $i(\beta + k - \sqrt{7}k)$, $i(\beta + k + \sqrt{7}k)$.

对应得 7 个超模,如图 3 所示,(a)~(f) 超模为异相模,(g) 为同相模,对于相干合成,超模(g) 最有利.

当 7 芯结构的 PCF 纤芯间距离足够小,相对于 7 芯芯间间隔空气孔的排布,其互耦强度大大加强,当互耦合系数大于相位常数,即 $\beta < k$ 时,4 个本征值 $i(\beta - 2k)$, $i(\beta - k)$, $i(\beta - k)$, $i(\beta + k - \sqrt{7}k)$ 均小于 0,则(a),(b),(c),(f) 4 个模式将被截止,而只保留剩余的 3 个模式^[9].其中模式(g) 为同相位模式,且在剩余的 3 个模式中占主导地位,此时的出射光场相干最强.

3. 数值结果及分析

He-Ne 激光器发射的基模激光其光强按 Gauss 型函数分布.经过一个 40 倍的透镜,有利于提高耦合效率.

PCF 出射端的远场光强分布为

$$I(x, y, z) = \left[\sum_{m=1}^7 E_m(x, y, z) \right]^2, \quad (8)$$

其中 E_m 是第 m 根纤芯的远场超模.由 Fraunhofer 衍射理论可以得到

$$E_m(x, y, z) = \exp(ikz) \exp\{ik\theta^2 \cdot 2z\} \times \frac{kd^2}{i8z} \left[\frac{2J_1(kd\theta)}{kd\theta} \right], \quad (9)$$

其中 $\theta = \frac{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{2z}$, $x_j = s \cos(i\pi/3)$,

$y_j = s \sin(i\pi/3)$, ($j = 1, 2, \dots, 6$), s 为接收屏距光纤出射端面距离. $J_1(kd\theta)$ 是一阶 Bessel 函数.图 5(a) 所示为 PCF 的纤芯输出 7 束光束,能够观察到纤芯分别出射光束,并且具有一定的散射角.由于数码摄像时视角有倾斜,所以图像呈现出非对称结构,实际成像为对称结构,在光纤的出射端放置一个 40 倍透镜,调整透镜和光纤端面间的距离,使出射光经透镜后恰好准直,再经过 10 倍的透镜聚焦,在焦

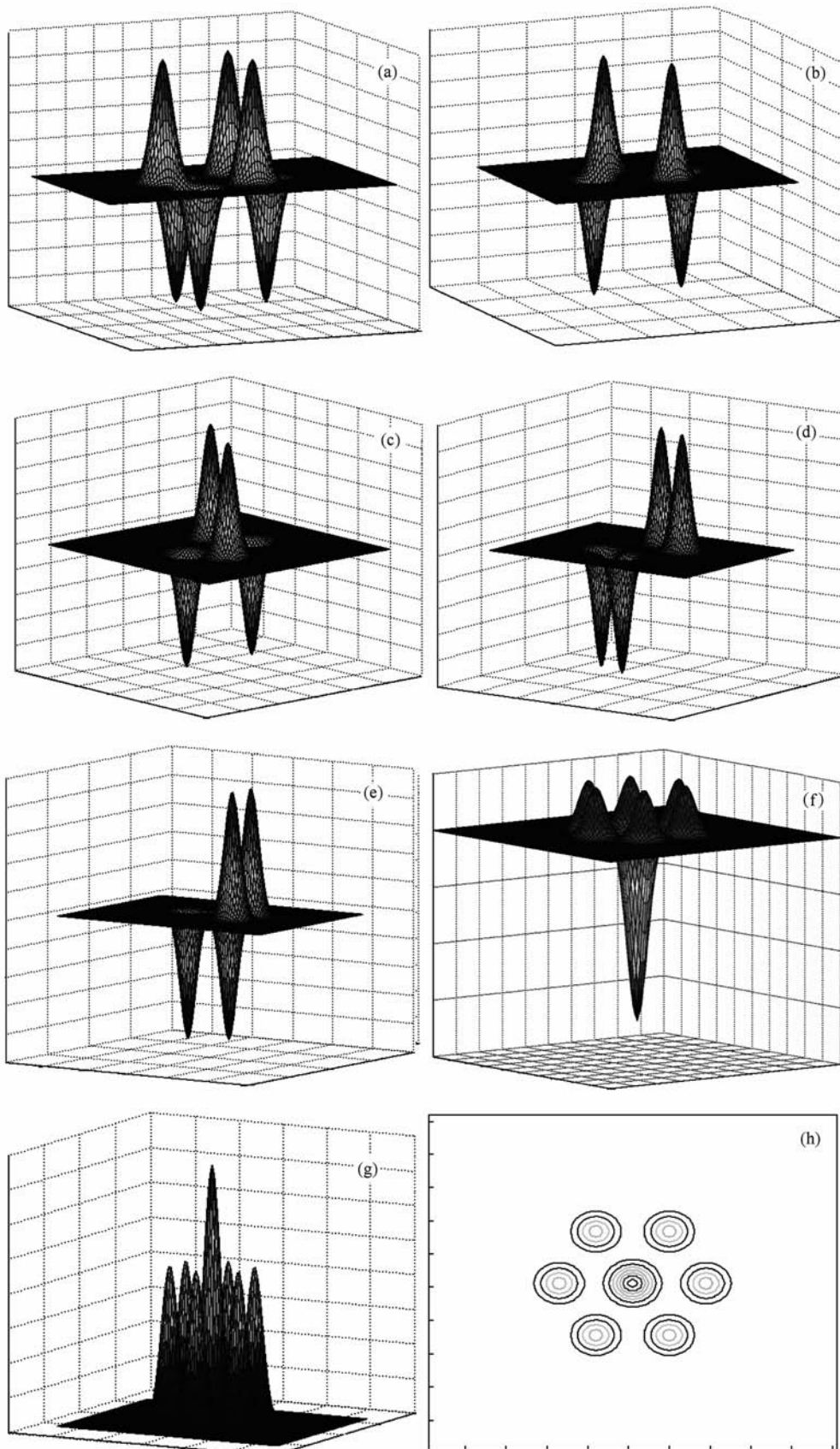


图3 7 芯 PCF (a)–(g) 双包层 7 芯 PCF 的超模, (h) 同相位超模等强线图

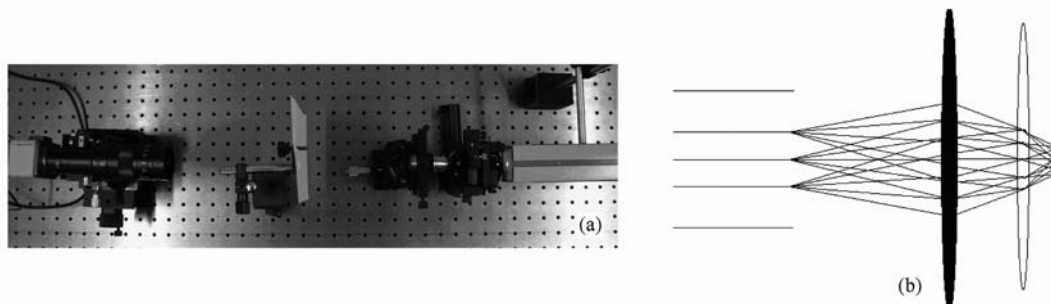


图 4 (a) 实验装置, (b) 输出端光束相干合成原理图

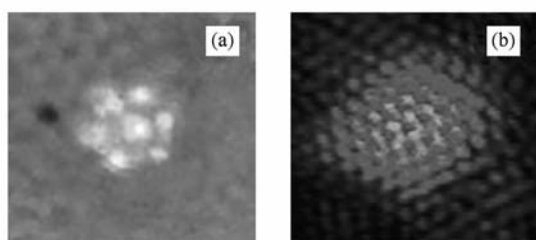


图 5 PCF 的输出 (a) 近场像斑, (b) 相干合成的像

点处可得到远场合成像斑,如图 5(b)所示. 能量增强,理论上光斑中心光强可达到每个纤芯光强的 7^2 倍.

理想状况下,当各纤芯出射光束的纵向相位差为 0,且光程差为 0 时,得到的 0 级条纹为相干合成光强最大,如图 6 所示. 在这种情况下的合成,既能保持与单元光束相同的光束质量,又能达到最大的远场峰值强度. 由实验结果得到了明暗相间的条纹,实现了相干. 理论上认为,如果合成效果很好,相干合成像斑则为极亮的光斑. 本实验没有形成极亮的光斑,这是由于光纤拉制过程中造成光纤结构的微小形变,导致光传输过程中相位发生偏移,结果成为部分相干合成,使得相干强度处于相干合成与非相干合成之间,相干合成效果之间不再是简单 N^2 与 N 的关系^[10].

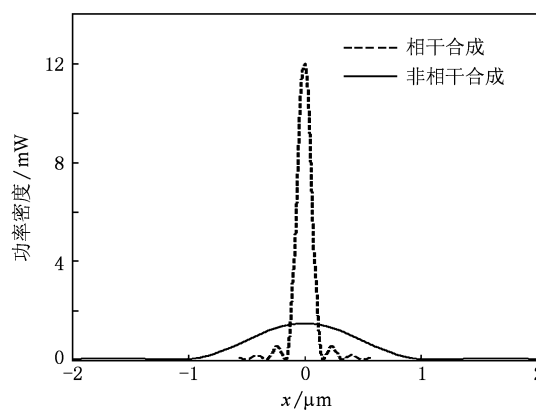


图 6 相干合成谱密度对比

4. 结 论

依据耦合模理论分析了多芯光子晶体光纤的超模特性. 改变纤芯直径和折射率,异相模可被截止,最终只有同相模相干加强. 利用实验室制作的 7 芯 PCF,各个纤芯可以单独传输光束,通过倏逝波对 7 束光的相位调节,可实现相干合成,激光亮度得到很大提高. 多芯 PCF 同时也能提高有效模场面积,而且由于各纤芯间的均匀分布,共用同一包层,减少了外界的干扰,更有利于保持同相位的传输,实现相干合成. 此结构对进一步研究双包层多芯光子晶体光纤,产生大功率激光提供了理论基础.

- [1] Bruesselbach H, Minden M, Rogers J L, Jones D C, Mangir M S 2005 *Conference on Lasers and Electro-Optics* Baltimore, USA, May 22—27, 2005 p532
- [2] Michaille L, Bennett C H, Shepherd T J 2004 *Proc. SPIE* **5335** 170

- [3] Cheo P K, Liu A, King G G 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 439
- [4] Mafi A, Moloney J V 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 348
- [5] Birks T A, Knight J C, Russell P S J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [6] Ni Y, Yin J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 130 (in Chinese) [倪

- 赧、印建平 2006 物理学报 **55** 130]
- [7] Wragge M, Glas P, Leitner M 2001 *Opt. Lett.* **25** 980
- [8] Ren G B, Wang Z, Lou S Q, Jian S S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2600 (in Chinese) [任国斌、王智、娄淑琴、简水生 2004 物理学报 **53** 2600]
- [9] Fang X H, Hu M L, Su Y F, Chai L, Wang Q Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2495 (in Chinese) [方晓惠、胡明列、栗岩峰、柴路、王清月 2009 物理学报 **58** 2495]
- [10] Zhou P, Liu Z J, Xu X J, Chen Z L 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 730 (in Chinese) [周朴、刘泽金、许晓军、陈子伦 2008 光学学报 **28** 730]

Numerical and experimental study on coherent combining of double cladding multi-core photonic crystal fiber*

Han Wei-Tao^{1)†} Hou Lan-Tian¹⁾²⁾ Geng Peng-Cheng¹⁾

1) (*Institute of Infrared Optical Fibers & Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*State Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China*)

(Received 30 October 2009; revised manuscript received 19 January 2010)

Abstract

The supermodel mode field characteristics of double cladding multi-core photonic crystal fiber were analyzed with coupled-mode theory. Through the phase adjustment of evanescent wave on 7 beams of light, one can realize the coherent combination, by which the laser brightness is greatly enhanced. We analyzed and measured the coherent power density of the light emitted from the double cladding multi-core photonic crystal fiber using coherent combination theory, and provide the theoretical and experimental basis for this multi-core photonic crystal fiber to achieve self-coherent synthesis.

Keywords: photonic crystal fiber, multi-core, supermodel, coherent combination

PACC: 4280M, 6185, 4460F

* Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60637010) and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2008000867).

† E-mail: hanhan598@hotmail.com