

文章编号: 1001-3806(2014)04-0455-04

正方形五芯光子晶体光纤的耦合特性分析

钱燕, 刘敏*, 杨静, 马云华
(重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

摘要: 为了研究基于正方形晶格排列的五芯光子晶体光纤(PCF)的结构参量对耦合特性的影响, 根据其5个超模特征, 给出计算五芯PCF耦合长度的方法, 利用有限元法分析了传输波长以及光纤结构对五芯PCF耦合特性的影响。结果表明, 耦合长度随着传播波长的增加而减小, 随着孔间距、占空比、纤芯折射率以及纤芯直径的增加而增加。该研究为设计基于五芯PCF的定向耦合器提供了理论依据。

关键词: 光纤光学; 耦合长度; 有限元法; 耦合理论

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.005

Analysis of coupling characteristics of square five-core photonic crystal fibers

QIAN Yan, LIU Min, YANG Jing, MA Yunhua

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To study the influence of the structure parameters of a square five-core photonic crystal fiber (PCF) on coupling characteristics, according to the characteristics of its five super-modes, a method to calculate the coupling length of the PCF was given. The effect of the wavelength and the structure parameters on the coupling characteristics of the PCF was numerically studied in detail with the finite element method. The results show that the coupling length increases with the increase of the core-to-core distance, air-filling ratio, core refractive index and core diameter. However, the coupling length decreases with the increase of the wavelength. The results will provide the theoretical foundations for the design of directional couplers based on five-core PCFs.

Key words: fiber optics; coupling length; finite element method; coupled-mode theory

引言

光子晶体光纤由于其无尽的单模传输、可控的非线性、灵活的色散及大面积^[1-5]等特性而成为近年来研究的热点。其中多芯光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)因具有更大的模场面积和更新颖的导光特性而在很多光学器件中有着重要的运用, 如光纤定向耦合器^[6]、矢量传感器^[7]、光纤激光器^[8]等。目前对多芯PCF特性的理论研究主要包括双芯PCF的耦合特性^[9]、模间色散特性^[10]、高双折射特性^[11]以及三芯、四芯光纤的非线性特性^[12-13]等, 与三芯、四芯PCF相比, 五芯PCF具有更大的模面积, 更有望获得高功率、高光速质量的激光输出。

多芯PCF纤芯间的耦合特性对相位锁定^[14]具有决定作用, 是设计多芯PCF波分复用器和定向耦合器的理论依据, 目前鲜有报道基于正方形晶格排列的五芯光子晶体光纤的耦合特性的研究。作者由五芯PCF 5个超模的特性研究模式和耦合特性之间的关系, 利用有限元法详细分析了五芯PCF结构参量对耦合特性的影响, 为设计基于多芯PCF的光学器件提供理论依据。

1 理论模型

基于正方形排列的五芯光子晶体光纤的横截面结构如图1a所示, 空气孔采用正方形排列, 纤芯1和距离中心 3Λ 位置的纤芯2、纤芯3、纤芯4、纤芯5通过填充高折射率材料形成纤芯。其结构参量为: 纤芯折射率 $n_1 = 1.46$, 背景折射率 $n_2 = 1.45$, 空气孔的折射率 $n_3 = 1$, 空气孔间距 $\Lambda = 2.6\mu\text{m}$, 空气孔直径为 d , 占空比 d/Λ , 纤芯直径 $D = 3\mu\text{m}$, 此时归一化频率 $\nu < \pi$, 每个纤芯保证单模传输^[15]。图1b所

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61007049)

作者简介: 钱燕(1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事多芯光子晶体光纤、光纤光栅方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liumin@cqu.edu.cn

收稿日期: 2013-09-05; 收到修改稿日期: 2013-10-11

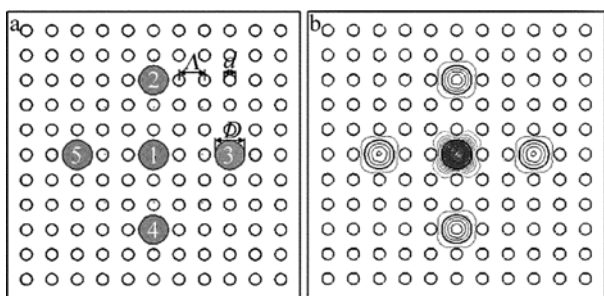


Fig. 1 a—cross-section of five-core photonic crystal fiber b—in-phase mode field distribution

示为 5 个纤芯在波长 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 时的同相位模场分布图,可以看出各纤芯中的模场只是强度不同,并没有改变其单模输出特性。

利用有限元法求得五芯 PCF 各超模的电场矢量分布图如图 2a ~ 图 2e 所示,依次为第一超模到第五超模,由图 2 可知,第一超模与第五超模分别为反对称模和对称模,且除了第一超模和第五超模外,其余超模纤芯 1 中电场矢量为 0,因而对于纤芯 1 而言,超模 1 和超模 5 在传播方向上发生周期性的相加和相减,导致中间纤芯和外围 4 个纤芯之间的场功率进行周期性交换。利用双芯 PCF 耦合长度的计算方法^[16]来求解五芯 PCF 的耦合长度,此处耦合长度即为中间纤芯能量完全转移到外围纤芯时所传播的距离,从模式理论角度来说,即为对称模和反对称模产生“差拍”的一半,对应为第一超模和第五超模产生“差拍”长度的一半,因而对于五芯 PCF 而言,其耦合长度的计算方法为:

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_5 - \beta_1} = \frac{\lambda}{2(n_5 - n_1)} \quad (1)$$

式中, n_5, n_1 表示第五超模和第一超模对应的有效折射率, λ 是传输光波长, β_5 和 β_1 表示第五超模和第一超模对应的传播常数。

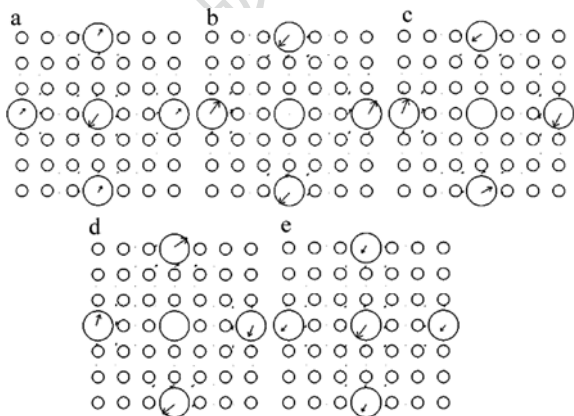


Fig. 2 Distribution of the electric field vector

2 耦合特性分析

基于上述求解耦合长度的方法,在结构参量分别为 $\Lambda = 2.6\mu\text{m}, d/\Lambda = 0.45, n_1 = 1.46, D = 3\mu\text{m}, \lambda = 1.55\mu\text{m}$ 时,通过有限元法求得超模的有效折射率 $n_1 = 1.441055, n_5 = 1.441157$,代入(1)式中得到 $L_c = 7598\mu\text{m}$ 。在相同的参量结构下,通过光速传播法得到的模场分布随传输距离的变化如图 3 所示。图 3a 为光从中间纤芯 1 入射时的模场分布,图 3b 为经过传输长度 $L = 7357\mu\text{m}$ 时各纤芯的模场分布。由图 3b 可知,由于周围 4 个纤芯对称分布,纤芯 1 中的能量平均分配到周围 4 个纤芯中,在传输长度 $L = 7357\mu\text{m}$ 时,中间纤芯 1 中功率由极大值降至极小值,此长度与给出的计算耦合长度求得的耦合长度 $7598\mu\text{m}$ 比较,两者耦合长度误差为 4.45%,研究表明该误差为系统误差,跟计算选取的网格和步长有关。

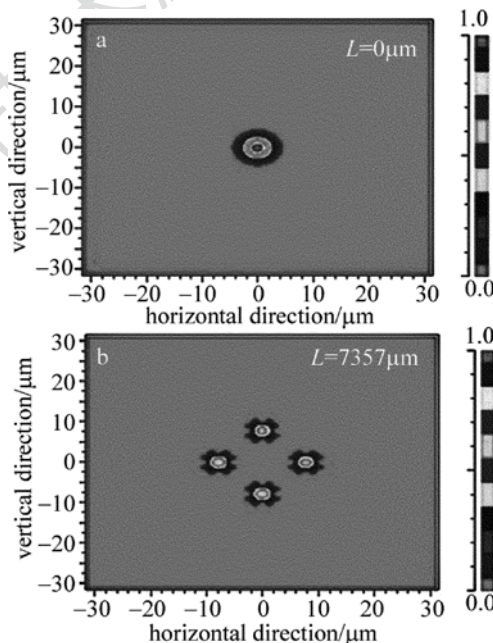


Fig. 3 Modefield distributions at $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

由导波光学理论可知,光纤结构和传播波长的改变将导致模场面积和模场分布的变化,从而引起耦合长度 L_c 的变化。图 4 为纤芯折射率为 $n_1 = 1.46$ 、空气孔占空比 $d/\Lambda = 0.45$ 、纤芯直径 $D = 3\mu\text{m}$ 、孔间距 Λ 从 $2.4\mu\text{m}$ 变化到 $2.8\mu\text{m}$ 时,耦合长度 L_c 随波长的变化曲线。由图 4 可以看出,随着传播波长 λ_0 的增加,耦合长度 L_c 逐渐减小。这是因为光波在纤芯表面发生全内反射,透射波的衰减系数 α ^[17] 可以表示为: $\alpha = 2\pi(n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2)^{1/2} / \lambda_0$,

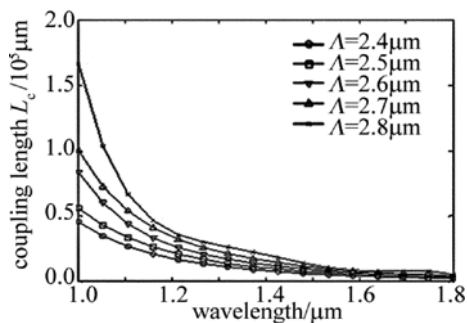


Fig. 4 Coupling length L_c as a function of wavelength and core-to-core distance

其中 λ_0 代表光在真空中的波长, n_1 为纤芯的折射率, n_2 为包层的折射率。由 α 的计算公式可以看出, 当波长 λ_0 增加时, 衰减系数 α 减小, 光波从纤芯 1 中透射到周围 4 个纤芯时更容易, 耦合长度变短。同时在传输波长 λ_0 一定时, 耦合长度 L_c 随着 Λ 的增大而增大, 这是因为纤芯间距的增大将引起相邻两纤芯间模场有效交叠面积的减小, 从而导致纤芯间的耦合作用减弱, 耦合长度增加。

图 5 为纤芯折射率为 $n_1 = 1.46$ 、孔间距 $\Lambda = 2.6\mu\text{m}$ 、纤芯直径 $D = 3\mu\text{m}$ 、占空比 d/Λ 从 0.35 变化到 0.55 时, 耦合长度 L_c 随占空比的变化情况。由图可知, 当占空比 d/Λ 增加时, 耦合长度 L_c 增加, 这主要是由于占空比增加时, 纤芯对光的束缚能力增强, 模场面积减小, 纤芯间耦合效应变弱, 导致耦合长度增加。在 $1.55\mu\text{m}$ 传输波长处, 占空比 $d/\Lambda = 0.35$ 和 $d/\Lambda = 0.55$ 时, 耦合长度分别为 $2980\mu\text{m}$, $23484\mu\text{m}$, 耦合长度明显增加, 因此可以通过减小占空比来减小耦合长度。

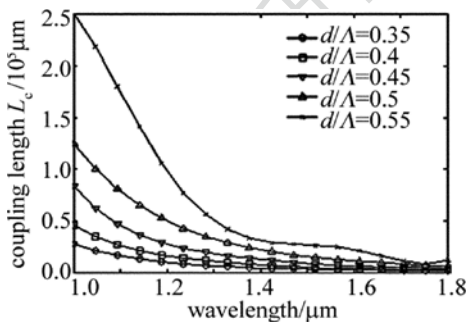


Fig. 5 Coupling length L_c as a function of air-filling ratio

图 6 所示为孔间距 $\Lambda = 2.6\mu\text{m}$ 、纤芯直径 $D = 3\mu\text{m}$ 、占空 $d/\Lambda = 0.45$ 、纤芯折射率 n_1 从 1.45 变化到 1.47 时, 耦合长度 L_c 随纤芯折射率的变化曲线。由图 6 可知, 耦合长度 L_c 随着纤芯折射率 n_1 的增加而增加, 导致这一变化趋势的原因是当纤芯折射率 n_1 增加时, 透射波的衰减系数 α 也会增大, 导致

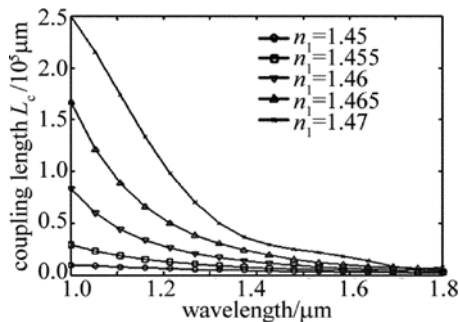


Fig. 6 Coupling length L_c as a function of core refractive index
倏逝波在纤芯间的渗透变得更加困难, 耦合长度增加。从 6 图中可以看出在波长 $1.0\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$ 范围内, 耦合长度差异较大, 但在 $1.6\mu\text{m} \sim 1.8\mu\text{m}$ 范围内, 耦合长度差异较小, 这一结果表明, 随着波长的增加, 纤芯折射率对耦合长度的影响减小。

图 7 为孔间距 $\Lambda = 2.6\mu\text{m}$ 、纤芯折射率 $n_1 = 1.46$ 、占空比 $d/\Lambda = 0.45$ 、纤芯直径 D 从 $2.0\mu\text{m}$ 变化到 $3.5\mu\text{m}$ 时, 耦合长度 L_c 随纤芯直径的变化曲线。由图 7 可知, 当纤芯直径增加时, 耦合长度 L_c 增加。这主要是因为当纤芯直径增加时, 虽然模面积有所增加, 但各纤芯对光的束缚能力更强, 最终在两者的共同作用下导致纤芯之间耦合效应减弱, 耦合长度增加。在通信窗口 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 处, 耦合长度 L_c 随纤芯直径变化比较明显, 因而可以通过调节纤芯直径来满足特定耦合长度的要求。

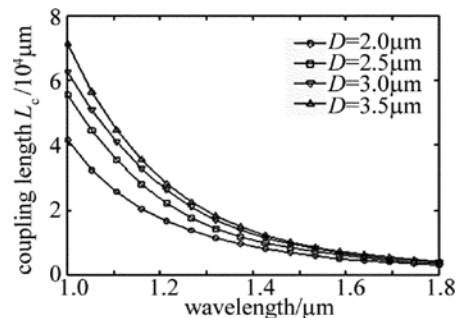


Fig. 7 Coupling length L_c as a function of core diameter

3 结 论

根据 5 个超模的电场矢量图研究模式和耦合特性之间的内在联系, 通过超模有效折射率求解耦合长度, 与光速传播法计算结果比较, 两者展现了很好的一致性。对于五芯 PCF 而言, 孔间距 Λ 、占空比 d/Λ 、纤芯折射率 n_1 以及纤芯直径 D 的增加都将导致纤芯对光束束缚能力增加, 模场的交叠面积减小, 消逝波在纤芯之间的渗透变得更加困难, 因而导致耦合长度 L_c 增加。而对于结构一定的五芯 PCF 而言,

随着波长的增加,光的渗透能力增强,纤芯之间耦合变得更加容易,最终耦合长度 L_c 减小,这些结论对设计用于通信的多芯光纤的波分复用器以及定向耦合器具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] SAITOH K, KOSHIBA M. Numerical modeling of photonic crystal fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(11): 3580-3590.
- [2] JAN D, LIU M, HE D, *et al.* Research of photonic crystal fiber with high nonlinear flattened dispersion property[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 187-190 (in Chinese).
- [3] LIAO Zh Y, LIU M, QIAN Y, *et al.* Octagonal dispersion compensation fiber[J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 506-510 (in Chinese).
- [4] LING F, GAN X S, GU M. Nonlinear optical microscope based on double-clad photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2005, 13(14): 5528-5534.
- [5] LIMPET J, SCHREIBER T, NOLTE S, *et al.* High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. Optics Express, 2003, 11(7): 818-823.
- [6] BERGH R A, KOTLER G, SHAW H J. Single-mode fibre optic directional coupler[J]. Electronics Letters, 1980, 16(7): 260-261.
- [7] YANG S. Directional pattern of a cross vector sensor array [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(4): 3484-3489.
- [8] WADSWORTH W, PERCIVAL R, BOUWMANS G, *et al.* High power air-clad photonic crystal fibre laser[J]. Optics Express, 2003, 11(1): 48-53.
- [9] LIU M, CHIANG K S. Propagation of ultrashort pulses in a nonlinear two-core photonic crystal fiber[J]. Applied Physics, 2010, B98(4): 815-820.
- [10] LIU M, CHIANG K S. Two-core photonic crystal fiber with zero intermodal dispersion [J]. Optics Communications, 2012, 293(15): 49-53.
- [11] LI D, LIU M, JIAN D, *et al.* Study on characteristics of highly birefringent dual-core photonic crystal fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 106-110 (in Chinese).
- [12] LIU M, CHIANG K S. Nonlinear switching of ultrashort pulses in multicore fibers [J]. Quantum Electronics, 2011, 47(12): 1499-1505 (in Chinese).
- [13] YI Ch Sh, ZHANG P Q, DAI Sh X, *et al.* Research progress of large-mode area photonic crystal fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012(10): 1-11 (in Chinese).
- [14] CHEO P K, KING G G, HUO Y. Recent advances in high-power and high-energy multicore fiber lasers[J]. Proceedings of the SPIE, 2004, 5335: 106-115.
- [15] FANG X H, CHAI L, HU M L, *et al.* Numerical analysis for structure optimization of seven-core photonic crystal fibers [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(4): 2495-2500 (in Chinese).
- [16] MA L F, LIU M, LI D, *et al.* A kind of hollow dual-core photonic crystal fiber with zero inter-modal dispersion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 129-134 (in Chinese).
- [17] GENG P Ch. Research on seven-core and bandgap Yb-doped photonic crystal fibers [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010: 21-25 (in Chinese).