

三角结构三芯光子晶体光纤中的模式耦合特性分析*

李 鹏 赵建林[†] 张晓娟 侯建平

(西北工业大学理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 西安 710072)

(2010 年 1 月 24 日收到; 2010 年 7 月 30 日收到修改稿)

基于耦合模理论, 得出了三角结构三芯光子晶体光纤(TTC-PCF)的耦合模方程. 数值模拟研究了该结构中纤芯间的定向耦合特性, 分析了光纤结构及入射波长对耦合系数的影响以及入射光振幅比对纤芯间能量耦合特性的影响. 结果表明, 通过调节入射光振幅比可实现对纤芯间耦合强度的连续调节. 对比了耦合模理论与束传播法得到的结果, 两者表现出很好的一致性. 结合 TTC-PCF 展现的独特耦合传输性能, 讨论了其在耦合强度连续可调光纤定向耦合器和大模场光纤激光器的设计与制备等方面的可能应用前景.

关键词: 光子晶体光纤, 耦合模理论, 耦合系数, 三角结构

PACC: 4280M, 4281M

1. 引 言

近年来, 光子晶体光纤^[1](PCF) 由于具有无截止波长的单模传输、超高非线性、色散可调等特性^[2-4] 而得到广泛关注. 其中多芯 PCF 由于具有更大的模场面积和更新颖的导光特性, 因而其在光纤定向耦合器^[5-7]、矢量传感器^[8]、光纤激光器^[9] 等方面具有巨大的应用潜力. 迄今为止, 对多芯 PCF 的研究主要集中于双芯结构, 并且主要利用耦合模理论(CMT)和束传播法(BPM)对双芯 PCF 的耦合特性进行数值分析^[10-14], 也有关于双芯 PCF 用于传感器、耦合器及多芯 PCF 激光器制作的实验研究报道^[15-17], 但对于三芯或三芯以上的多芯 PCF 中光波的耦合传输特性的研究却鲜见报道.

三角结构三芯光子晶体光纤(TTC-PCF)是制作大模场 PCF 激光器时最常用的, 因此研究这种结构 PCF 的耦合传输特性具有重要的意义. 本文主要分析 TTC-PCF 的耦合传输特性及其应用可行性. 首先, 基于光波导 CMT^[18, 19] 建立 TTC-PCF 的耦合模方程, 并利用该耦合模方程分析光纤结构、入射波长对 TTC-PCF 耦合系数和耦合长度的影响; 其次, 分析入射光振幅比对 TTC-PCF 中的模场分布及能量耦合的影响, 并结合超模理论对所得结果进行验

证; 进而, 将利用 CMT 所得的结果与 BPM^[14] 的结果进行比较; 最后, 结合 TTC-PCF 所展现的独特的耦合传输性能, 讨论其在光纤激光器和光纤定向耦合器方面的应用前景.

2. CMT

CMT 是研究光波导中耦合传输的一种有效方法, 广泛应用于光波导的定向耦合研究. TTC-PCF 的端面结构如图 1 所示, d 为空气孔直径, Λ 为空气孔间距, $n = 1.45$ 为背景材料折射率, 纤芯 1、纤芯 2 和纤芯 3 分别为三个呈三角结构排列的纤芯, 芯间距为 D .

假设光纤沿横截面的折射率分布为 $n(x, y)$, 则在其中传播的单色光波电场所满足的亥姆霍兹方程为

$$\nabla^2 \mathbf{E} + n(x, y)k_0 \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为光波在真空中的波长.

设(1)式具有如下近似解:

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \sum_{m=1}^3 A_m(z) F_m(x, y) \exp(i\beta_m z), \quad (2)$$

式中 $F_m(x, y)$, $A_m(z)$ 和 β_m 分别为第 m 个纤芯中的模场空间分布、慢变振幅和传播常数. 假设入射光波为强度较弱的连续波, 则可以忽略非线性项的影响和时间变化项. 于是, 将(2)式代入(1)式, 可得

* 西北工业大学基础研究基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

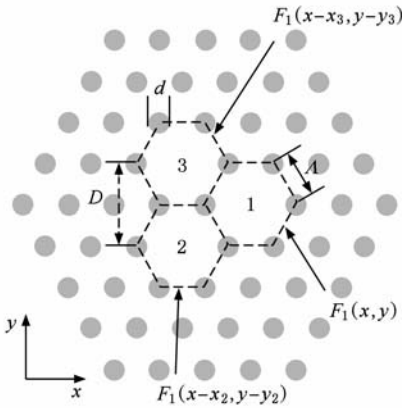


图 1 TTC-PCF 结构示意图

如下三个耦合模方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} &= i(\delta_{12} + \delta_{13})A_1 + i\kappa_{12}A_2 + i\kappa_{13}A_3, \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} &= i(\delta_{21} + \delta_{23})A_2 + i\kappa_{21}A_1 + i\kappa_{23}A_3, \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} &= i(\delta_{31} + \delta_{32})A_3 + i\kappa_{31}A_1 + i\kappa_{32}A_2. \end{aligned} \quad (3)$$

这里 $\delta_{lm} = (\beta_l - \beta_m)/2$ ($l, m = 1, 2, 3$), 其中 β_l 为第 l 个纤芯中的传播常数; κ_{lm} 为第 l 个纤芯与第 m 个纤芯之间的耦合系数, 表征两个纤芯之间能量转移的快慢. 耦合系数 κ_{lm} 不仅与折射率分布有关, 还与纤芯中的模场分布有关, 可表示为

$$\begin{aligned} \kappa_{lm} &= \frac{k_0}{2\beta_{lm}} \iint_{\Omega} [n^2(x, y) - n_l^2(x, y)] \\ &\quad \times F_l^*(x, y) F_m(x, y) d\Omega, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $n_l(x, y)$ 表示第 l 个纤芯以外区域的折射率分布, $\beta_{lm} = (\beta_l + \beta_m)/2$, Ω 为 PCF 截面积分区域. 当 TTC-PCF 的纤芯具有结构对称性时, 每个纤芯中的模场分布也具有对称性, 同时具有平移对称性, 并且可以通过平移纤芯 1 中的模场得到纤芯 2 和纤芯 3 中的模场, 即 $F_2(x, y) = F_1(x - x_2, y - y_2)$, $F_3(x, y) = F_1(x - x_3, y - y_3)$, 其中 x_m 和 y_m 分别为第 m 个纤芯中的模场分布中心相对于纤芯 1 中的模场分布中心在 x 方向和 y 方向上的平移量, 每个平移量满足条件 $x_m^2 + y_m^2 = D^2$. 在这种情况下, 耦合系数 κ_{lm} 可以进一步写为

$$\begin{aligned} \kappa_{lm} &= \frac{k_0}{2\beta_{lm}} \iint_{\Omega} [n^2(x, y) - n_l^2(x, y)] \\ &\quad \times F_l^*(x, y) F_l(x - x_m, y - y_m) d\Omega. \end{aligned} \quad (5)$$

对于对称型多芯光纤耦合器, 可得 $\delta = 0$, $\kappa_{lm} = \kappa_{ml}$. 通过计算 TTC-PCF 纤芯中的模场分布, 可以得到纤

芯间的耦合系数 κ , 然后利用(3)式可得出纤芯中能量随传输距离的转移规律. 为了更好地理解能量在纤芯中的耦合, 假设第一次最大能量由入射纤芯转移到其他相邻纤芯中的最短距离为耦合长度, 用 L_c 表示.

3. 结果分析及讨论

现采用 CMT 数值模拟分析纤芯中仅含基模时, TTC-PCF 的耦合特性, 包括 TTC-PCF 结构与入射波长 λ 对耦合系数 κ 和耦合长度 L_c 的影响以及入射光振幅比对能量耦合的影响.

图 2 为 $d = 1.0 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $D = \sqrt{3}\Lambda$, $\lambda = 800 \text{ nm}$ 条件下, 利用 CMT 得到的模场分布随传输距离 L 的变化. 图 2(a) 显示了入射端模场分布情况, 三个纤芯的归一化入射振幅分别为 $A_1 = 1$, $A_2 = A_3 = 0$. 从图 2(b) 可以看出, 随着传输距离 L 的增大, 能量不断由纤芯 1 向纤芯 2 和纤芯 3 中耦合, 当传输距离 $L = 148 \mu\text{m}$ 时, 纤芯 2 和纤芯 3 中已经出现了清晰的模场分布. 从图 2(b) 还可以看出, 由于所用 PCF 结构的对称性, 耦合系数 $\kappa_{12} = \kappa_{13} = \kappa_{23}$, 故纤芯 2 和纤芯 3 中的耦合能量分布相同, 亦具有对称性. 图 2(c) 为 $L = 276 \mu\text{m}$ 时的模场分布情况, 此时纤芯 2 和纤芯 3 中耦合的能量达到最大值, 纤芯 1 中的能量减至最小, 但由于受入射条件影响, 此最小值并不等于零. 图 2(d) 为 $L = 380 \mu\text{m}$ 时的模场分布情况, 此时纤芯 1 中的能量强于纤芯 2 和纤芯 3 中的能量, 表明随着传输距离 L 的增大, 纤芯 2 和纤芯 3 中的能量重新耦合回纤芯 1, 能量实际上是在三个纤芯之间周期性耦合转移. 整个传输过程中纤芯 2 和纤芯 3 之间也存在着能量耦合, 但由于两纤芯间的能量耦合具有对称性, 且两纤芯中的能量分布相同, 因而所产生的能量转移也是对称的. 图 3 完整地显示了一个耦合周期内三个纤芯中的归一化功率随传输距离 L 的变化情况.

3.1. TTC-PCF 结构和波长对耦合的影响

根据导波光学理论, 结构和波长的变化将引起光波导模场面积及模场分布发生相应变化, 由(4)式可知, 这种变化将导致波导耦合系数 κ 和耦合长度 L_c 的变化. 为了进一步了解光纤结构对光波耦合传输特性的影响, 计算了不同结构 TTC-PCF 的耦合系数 κ 和耦合长度 L_c 随波长 λ 的变化关系. 图 4

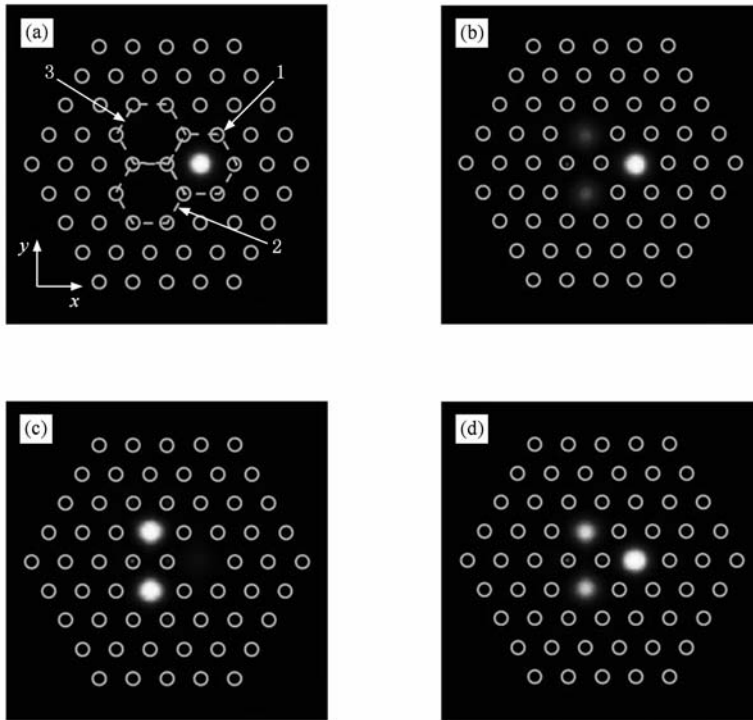


图2 模场分布随传输距离 L 的变化 (a) $L = 0 \mu\text{m}$, (b) $L = 148 \mu\text{m}$, (c) $L = 276 \mu\text{m}$, (d) $L = 380 \mu\text{m}$

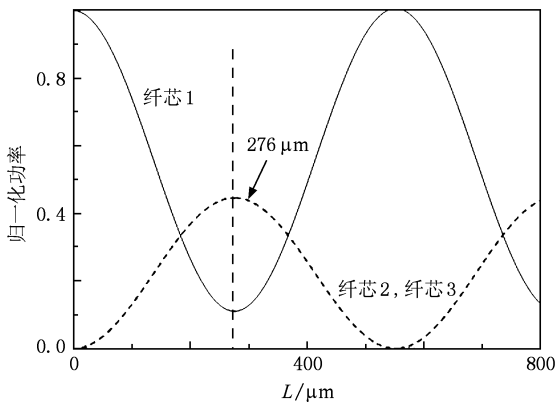


图3 纤芯归一化功率随传输距离 L 的变化

(a) 和 (b) 分别显示了 $D = \sqrt{3}\Lambda$, $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$ 情况下, 改变空气孔直径 d 时耦合系数 κ 和耦合长度 L_c 随波长 λ 的变化关系. 从图 4(a) 可以看出, 在空气孔间距 Λ 一定的情况下, 空气孔直径 d 越大, 耦合系数 κ 越小, 而耦合长度 L_c 越大. 从图 4(a) 还可以看出, 在空气孔直径 d 和空气孔间距 Λ 都一定的情况下, 随着波长 λ 的增大, 耦合系数 κ 逐渐增大, 耦合长度 L_c 不断减小. 图 4(c) 显示了在保持空气孔直径 d 和空气孔间距 Λ 不变的条件下, 将纤芯间距 D

增大到 2Λ 时, 耦合系数 κ 随波长 λ 的变化关系. 对比图 4(a) 和 (c) 可以看出, 当纤芯间距 D 增大时, 耦合系数 κ 显著减小. 图 4(d) 为固定空气孔直径 d 和纤芯间距 D 的条件下, 改变空气孔间距 Λ 时耦合系数 κ 随波长 λ 的变化关系. 随着空气孔间距 Λ 的增大, 两纤芯中心间距逐渐增大, 引起耦合系数 κ 逐渐减小, 耦合长度 L_c 逐渐增大.

分析以上结果可知, 对于 PCF 而言, 随着空气孔直径 d 的增大, 光的局域性能逐渐增强, 由此导致隐失波的穿透耦合能力不断减弱, 模场面积 (半径) 随之减小, 两个相邻纤芯中模场分布的有效交叠面积不断减小, 从而使耦合系数 κ 减小, 耦合长度 L_c 增大. 当纤芯间距 D 或空气孔间距 Λ 增大时, 也将引起相邻两纤芯间模场有效交叠面积的减小, 从而导致耦合系数 κ 的减小. 但是, 当结构固定时, 随着波长 λ 的增大, 光的穿透耦合能力不断增强, 耦合系数 κ 不断增大, 耦合长度 L_c 随之减小.

3.2. 入射光振幅比对耦合强度的影响

由 (3) 式可知, 能量耦合不仅与耦合系数 κ 有关, 还依赖于入射光的振幅. 耦合系数 κ 决定着能量转移的快慢, 而纤芯间入射光振幅比决定着纤芯

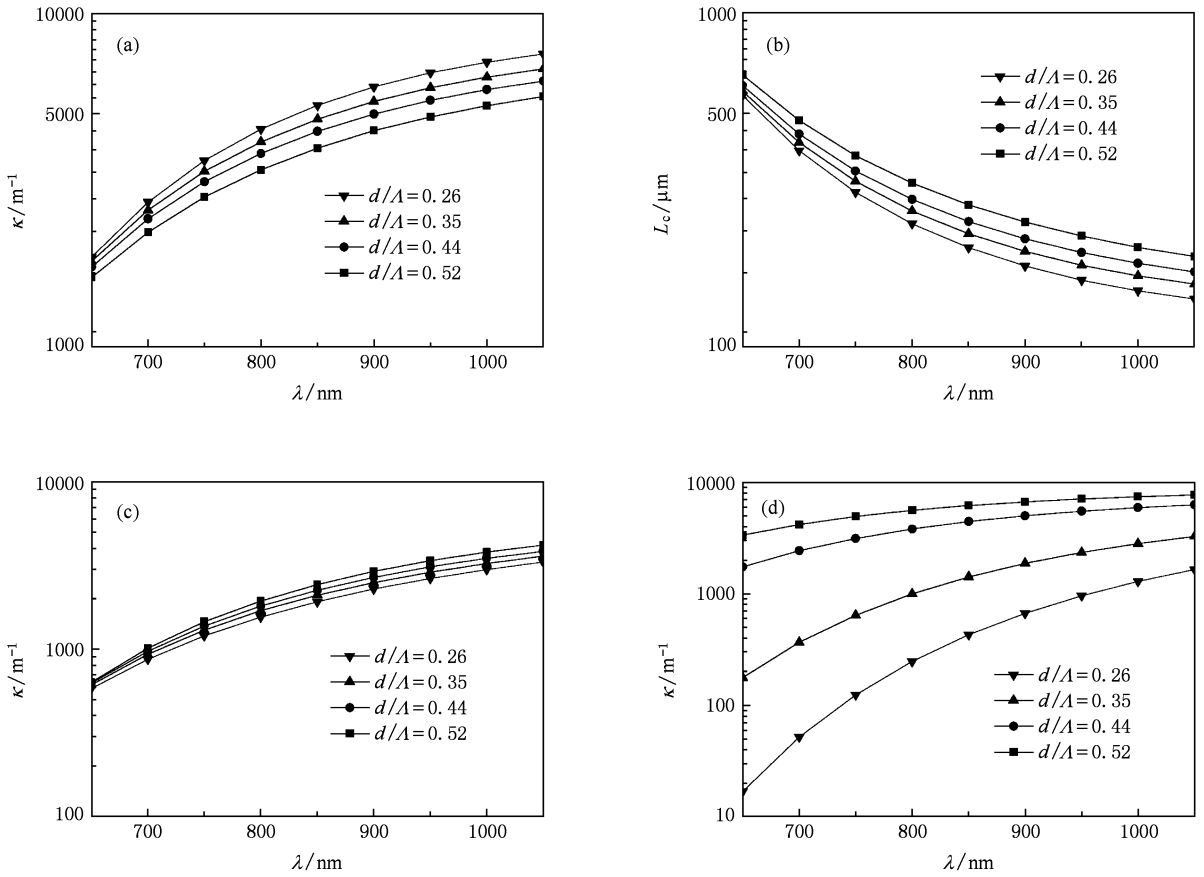


图4 耦合系数 κ 和耦合长度 L_c 随波长 λ 的变化 (a) $D = \sqrt{3}\Lambda, \Lambda = 2.3 \mu\text{m}$; (b) $D = \sqrt{3}\Lambda, \Lambda = 2.3 \mu\text{m}$; (c) $D = 2\Lambda, \Lambda = 2.3 \mu\text{m}$; (d) $D = \sqrt{3}\Lambda, d = 1 \mu\text{m}$

间能量转移的多少,用耦合强度 P 表示, P 定义为 一根纤芯中的能量在传输一个耦合长度 L_c 后转移到相邻纤芯中的最大能量对初始能量的归一化值.

图5给出了 $d = 1.0 \mu\text{m}, \Lambda = 2.3 \mu\text{m}$ 的 TTC-PCF 中,在 $\lambda = 800 \text{ nm}, A_2/A_1 = 0$ 的入射条件下,经一个耦合长度 L_c 的传输距离后输出端纤芯的耦合强度 P 随入射光振幅比 A_3/A_1 的变化. 计算过程中,入射条件均采用归一化值. 当 $A_3/A_1 = A_2/A_1 = 0$ 时,由于对称入射,从纤芯1中转移的能量平均分配到纤芯2和纤芯3中,此时纤芯2的耦合强度 P 最小. 随着 A_3/A_1 的不断增大,纤芯2中的能量不断增加,当 $A_3/A_1 = 1$ 时,纤芯2的耦合强度 P 达到最大值,此时纤芯中的能量90%集中在纤芯2中,并且纤芯1和纤芯3的能量再次相等. 由此可以得出,在对称入射条件下,能量转移也是对称的;在非对称入射条件下,耦合强度 P 随入射光振幅比连续变化,输出能量覆盖0—1的整个区间. 输入端的纤芯振幅比

A_2/A_1 确定后,通过调节纤芯3的入射光振幅来实现对纤芯1和纤芯2之间耦合强度 P 的调节,使得输出端纤芯振幅比 A_2/A_1 受 A_3 调节变化. 并且在 $A_3/A_1 = 1$ 的入射条件下,可以将 PCF 中的能量局域在单个纤芯中输出,大大提高了输出功率.

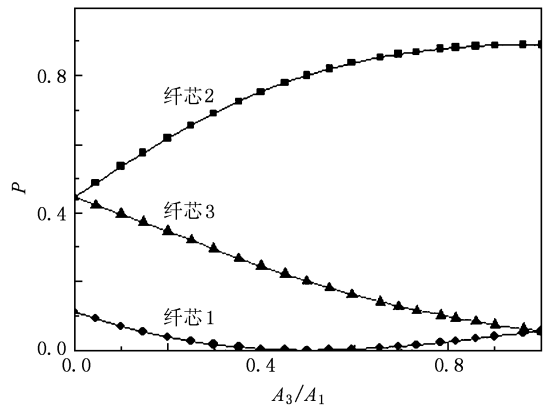


图5 耦合强度 P 随入射光振幅比的变化

图6所示为 $A_3/A_1 = 0.5, A_2/A_1 = 0$ 的入射条件

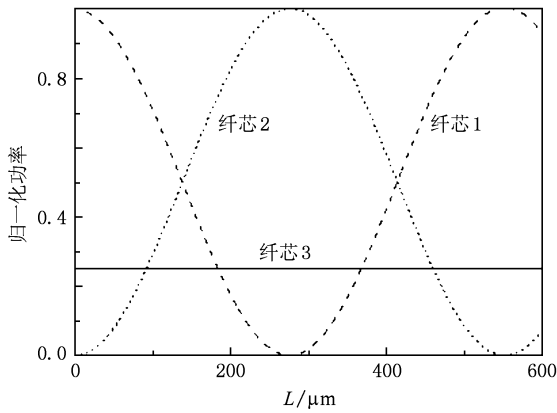


图6 在 $A_3/A_1 = 0.5, A_2/A_1 = 0$ 的入射条件下纤芯归一化功率随传输距离 L 的变化

下三个纤芯中归一化功率随传输距离 L 的变化. 从图6可以看出, 纤芯3中的能量不随传输距离 L 变

化, 能量只在纤芯1和纤芯2中周期性转移, 并且可以实现能量的全部转移. 这种情况可以简化为两芯之间的耦合情况, 由于两纤芯之间的距离较小, 因而可实现能量的全部转移.

多芯 PCF 中的能量转移过程可以用超模理论解释. 对于具有 N 个纤芯的 PCF, 求解模场可以得到 $2N$ 个本征值, 对应着 $2N$ 个本征模式, 由于具有 x 分量和 y 分量的简并, 每个分量上具有 N 个本征模, 这种本征模称为超模. 任意本征模均可以理解成 N 个独立纤芯中模式分布的线性叠加结果, 这种叠加特性由 PCF 结构决定. 本征模的激发由入射条件决定, 并且每一个本征模都以固有的传播常数传播, 彼此间存在相位差, 由此构成了纤芯间能量的周期性转移. 对于 TTC-PCF, 通过多种方法计算可以得到 6 个本征值, 其中 x 分量和 y 分量各具有 3 个本征模. 图7为 x 分量的 3 个本征模式的场强分布.

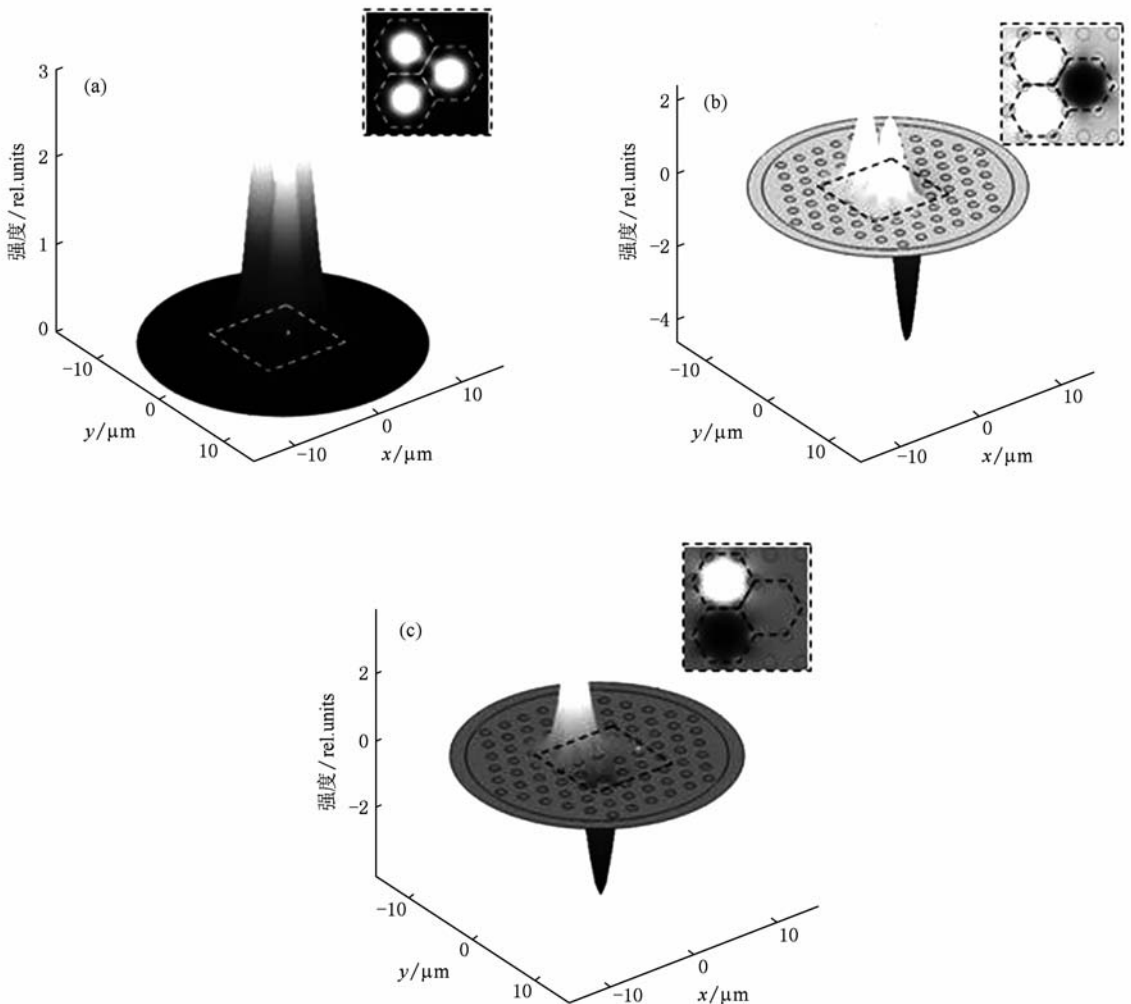


图7 偏振方向沿 x 方向的 3 个不同有效折射率 n_{eff} 本征模式的场强分布 (a) $n_{\text{eff}} = 1.44346$, (b) $n_{\text{eff}} = 1.44289$, (c) $n_{\text{eff}} = 1.44285$

当满足图 6 所示的入射条件时,即满足耦合器的超模激发条件(图 7(c)所示模式),在这种模式下,纤芯 3 中的能量不发生转移,能量只在纤芯 1 和纤芯 2 之间耦合,并且纤芯 1 和纤芯 2 中传输的光存在 $\pi/2$ 的相位差.

3.3. CMT 和 BPM 结果比较

为验证 TTC-PCF 的 CMT 分析结果的正确性和精确度,同时采用了 CMT 和 BPM 两种方法数值模拟了该结构 PCF 的耦合传输特性. BPM 是光波导器件分析中使用最广泛的一种方法. 图 8 为 $d = 0.6 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$ 条件下由 BPM 和 CMT 得到的耦合长度 L_c . 对比结果. 从图 8 可以看出:在短波段,两种结果存在 10% 的误差;随着波长的增大,两种方法所得结果的一致性逐渐增强. 经分析表明,误差主要由网格和步长引起.

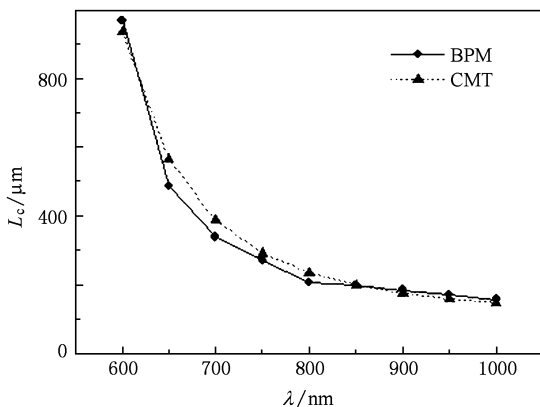


图 8 CMT 和 BPM 所得耦合长度 L_c 的对比

采用 BPM 计算耦合长度时,为了保证计算精度,通常选取的网格尺度和步长要小于入射波长. 在此情况下,如果 PCF 具有很小的耦合系数 κ ,即耦合长度 L_c 远大于入射波长 λ ,则一个耦合周期需要计算很多步,而且 BPM 计算的每一步都需要考虑 PCF 截面的折射率分布,大大增加了计算时间. 而采用 CMT 计算时,只要求得到纤芯中的模场分布,通过积分得到耦合系数 κ ,然后利用耦合系数 κ 和能量入射条件便可得到耦合传输特性,并且在保证计算精度的同时可以大大节省计算时间.

4. 应用展望

TTC-PCF 独特的耦合特性使其具有广阔的应用前景. 首先,该结构光纤在结构和入射波长确定的情况下纤芯间的能量耦合受入射光振幅比的调节,因此,以此机理制作的光纤定向耦合器除具有耦合强度连续可调的特点外,还具有可调范围宽的优点. 其次,当入射光振幅比满足 $A_3/A_2 = 1$ 时,利用该结构可以将 90% 的能量集中在单个纤芯中,这种功能可以有效降低激光器的阈值条件,将其应用于制作高功率半导体激光器时,增加纤芯的数目以构成 7 芯或 19 芯环形多芯 PCF 结构,并通过选择适当长度的该结构光纤作为腔体,可以实现能量全部转移至中间纤芯输出,从而大大提高激光器的输出功率. 此外,研究 TTC-PCF 纤芯间的结构与能量耦合特性的关系,可为用于超大容量长距离传输的多芯 PCF、图像放大光纤以及光纤放大器的设计和制作提供合理的判据,并且通过选择合适的纤芯间距,能够确保在显著增大光纤通信容量的同时,还可以有效降低纤芯信号间的相互串扰,由此设计出的多芯 PCF 将被广泛应用于光网络、生物医学图像传输、光纤放大器等领域.

5. 结 论

从光波导的 CMT 出发,导出了 TTC-PCF 的耦合模方程. 籍此对 TTC-PCF 的耦合特性进行了系统分析,主要包括光纤结构、入射波长对耦合系数和耦合长度的影响以及入射光振幅比对模场分布及能量耦合的影响,并比较了利用 CMT 与 BPM 计算结果的一致性. 结果表明:该 TTC-PCF 的耦合系数随着空气孔直径和纤芯间距的增大而逐渐减小,耦合长度则随之增大,并且波长越长,耦合系数越大;PCF 中激发和传输的模式受入射光振幅比影响,通过改变入射光振幅比,可以实现对能量耦合的连续调节;CMT 与 BPM 两种方法所得结果具有很好的-致性. 基于 TTC-PCF 所展现的独特耦合传输性能,相信其在耦合强度连续可调光纤定向耦合器和大模场光纤激光器的设计与制备等方面具有广阔的应用前景.

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [2] Birks T A, Knight J C, Russell P S J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [3] Broderick N G R, Monro T M, Bennett P J, Richardson D J 1999 *Opt. Lett.* **24** 1395
- [4] Zhang X J, Zhao J L, Hou J P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4668 (in Chinese) [张晓明、赵建林、侯建平 2007 物理学报 **56** 4668]
- [5] Saitoh K, Sato Y, Koshiba M 2003 *Opt. Express* **11** 3188
- [6] Fang X H, Hu M L, Li 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]
- [7] Khan K R, Wu T X, Christodoulides D N, Stegeman G I 2008 *Opt. Express* **16** 9417
- [8] Yu X, Shum P 2005 *Proc. SPIE* **5634** 571
- [9] Michaille L, Taylor D M, Bennett C R, Shepherd T J, Ward B G 2008 *Opt. Lett.* **33** 71
- [10] Fu B, Li S G, Yao Y Y, Zhang L, Zhang M Y, Liu S Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7708 (in Chinese) [付博、李曙光、姚艳艳、张磊、张美艳、刘司英 2009 物理学报 **58** 7708]
- [11] Mothe N, Bin P D 2009 *Opt. Express* **17** 15778
- [12] Reichenbach K L, Xu C 2005 *Opt. Express* **13** 10336
- [13] Varshney S K, Florous N J, Saitoh K, Koshiba M 2006 *Opt. Express* **14** 1982
- [14] Fogli F, Saccomandi L, Bassi P, Bellanca G, Trillo S 2002 *Opt. Express* **10** 54
- [15] Kim B, Kim T H, Cui L, Chung Y 2009 *Opt. Express* **17** 15502
- [16] Padden W E P, Van Eijkelenborg M A, Argyros A, Issa N A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1689
- [17] Michaille L, Bennett C R, Taylor D M, Shepherd T J, Broeng J, Simonsen H R, Petersson A 2005 *Opt. Lett.* **30** 1668
- [18] Haus H A, Huang W P, Snyder A W 1989 *Opt. Lett.* **14** 1222
- [19] Huang W P 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 963

Analysis of model coupling in photonic crystal fiber with triangular structure triple-core*

Li Peng Zhao Jian-Lin[†] Zhang Xiao-Juan Hou Jian-Ping

(Key Laboratory of Optical Information Technology of Shaanxi Province, Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry of Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 24 January 2010; revised manuscript received 30 July 2010)

Abstract

The coupled-mode equations in photonics crystal fiber with triangular structure triple-core (TTC-PCF) are achieved based on the coupled-mode theory, thereby the directional coupling between the cores in this structure is numerically studied in detail. The influences of the fiber structure and the incident wavelength on the coupling coefficient, and the effect of the amplitude ratio of the inject beams at the input end on the transfer of energy between the cores are analyzed. From the results, it can follow that continuous modulation of the coupling intensity between the cores can be achieved by changing the amplitude ratio of the inject beams. The coupled-mode theory and the beam propagation method present the results well consistent with each other. The unique coupling transmission performance of the TTC-PCF shows its possible applications in the design and the preparation of coupling strength continuously tunable fiber directional coupler and large mode field fiber lasers.

Keywords: photonic crystal fiber, coupled-mode theory, coupling coefficient, triangular structure

PACC: 4280M, 4281M

* Project supported by the Foundation for Fundamental Research of Northwestern Polytechnical University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: jlzha@nwpu.edu.cn