

# 一种覆盖全通信波段的新颖宽带偏振无关双芯光纤定向耦合器的研究\*

王立文 娄淑琴<sup>†</sup> 陈卫国 鹿文亮 王鑫

(北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2011年12月27日收到; 2012年1月10日收到修改稿)

提出了一种新型的双芯光子晶体光纤, 应用全矢量有限元方法分析了光纤各种结构参数对光纤宽带特性和偏振无关特性的影响. 在此基础上优化设计了一种 50:50 的双芯光子晶体光纤耦合器, 在 1.225—1.675  $\mu\text{m}$  波长范围内实现分光比小于 1%、两偏振态之间的分光比差小于 0.5% 的优良特性. 由于引入了仅对偏振特性影响明显的相对独立的中心调制区, 不仅降低了光纤的优化设计难度, 而且实现了与普通单模光纤相匹配的模场特性, 能有效地降低耦合器的接续损耗与制作难度. 研究成果为研制接续损耗低、超宽工作带宽、偏振不敏感等特性的新型光定向耦合器提供了理论基础.

**关键词:** 双芯光子晶体光纤, 宽带, 偏振无关, 光纤耦合器

**PACS:** 42.79.Gn, 42.81.-i, 42.81.Qb, 42.81.Uv.

## 1 引言

随着信息化社会的发展, 通信系统对带宽的需求日益增长, 宽带光通信网成为了未来通信发展的趋势. 而定向耦合器作为光通信网的关键器件在带宽和偏振控制等特性方面也面临着巨大的挑战.

光子晶体光纤特有的结构灵活性使其在超大模场面积光纤、高非线性光纤、高双折射光纤、双芯光纤等新型特种光纤研制方面具有很大的优势<sup>[1-5]</sup>. 通过灵活设计芯区和包层结构, 可以在双芯光子晶体光纤中实现偏振、工作带宽及模场面积等的控制, 实现传统双芯光纤难以实现的特性<sup>[6-8]</sup>. 2004年, Lægsgaard 等人通过芯区掺氟双芯光子晶体光纤实现了宽带光耦合器<sup>[6]</sup>, 但是两芯区共同作用形成的高双折射效应导致  $x$  与  $y$  偏振态的分光比差别很大. 2006年 Varshney 等人提出了一种芯区掺氟、包层采用椭圆形空气孔的双芯光子晶体光纤耦合器<sup>[7]</sup>, 虽然在 0.9—1.6  $\mu\text{m}$  波

长范围内具有宽带、偏振不敏感等特性, 但研制取向一致的椭圆空气孔, 制作难度极高; 此外, 包层区域空气孔间距为 12  $\mu\text{m}$  使得芯区模场面积远大于普通单模光纤的模场面积, 与普通单模光纤的直接接续损耗过高, 使基于这种光纤耦合器的插入损耗大; 最近, 我们课题组提出了一种芯区掺氟、包层区域空气孔为圆形, 仅两芯区之间的中心调制区采用椭圆形空气孔的双芯光子晶体光纤结构<sup>[9]</sup>, 基于该光纤的 50:50 光定向耦合器可以在 0.8—1.7  $\mu\text{m}$  波长范围内实现分光比误差小于 1% 且两偏振态之间的分光比差小于 2% 的优良性能. 只在中心调制区引入一个椭圆孔, 虽然减少了光纤的制作难度, 但是为了调节偏振特性中心调制区的椭圆形空气孔短轴长度小于包层空气孔直径, 使两个芯区模场产生畸变, 并且两芯区模场与中心椭圆孔紧邻间隔很小, 增大了光耦合器的输入光的引入及输出光分离难度.

综合考虑光纤及耦合器的制作可行性和应用需求, 本文提出了一种新型的双芯光子晶体光纤结

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB328206), 国家自然科学基金 (批准号: 60977033, 61177082) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2012YJS011) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

构, 在获得宽带偏振无关特性的同时, 有效地降低了与普通光纤的接续损耗, 减少了基于该光纤的耦合器的制作难度. 研究工作为研制新型宽带偏振无关光定向耦合器提供了理论基础, 突破现有耦合器的工作带宽窄、波长依赖性强、偏振敏感的限制, 为超大容量超高速率全光网络研究提供器件支撑.

## 2 光纤结构与理论模型

提出的双芯光子晶体光纤横截面结构如图 1 所示, 光纤由在纯石英背景材料上周期型排列空气孔的包层、两个掺氟低折射率芯区以及一个椭圆形空气孔中心调制区组成. 这里定义空气孔间距为  $\Lambda$ , 空气孔直径与空气孔间距比  $f = d/\Lambda$ , 掺氟芯区直径与空气孔间距比  $f_c = d_c/\Lambda$ , 掺氟区折射率与石英折射率差为  $\Delta_c$ , 中心调制区椭圆空气孔的长轴和短轴与空气孔间距比分别为  $f_x = d_x/\Lambda$ ,  $f_y = d_y/\Lambda$ .

有限元方法具有计算精度高及对光纤结构适应性强等优点, 已经被广泛用于光子晶体光纤的特性分析. 本文采用二次插值拟合的全矢量有限元方法分析双芯光子晶体光纤中的传输模式的有效折射率和模场分布等特性<sup>[10]</sup>, 进而可由下式得到双芯光子晶体光纤的耦合长度  $L_c$ 、基于该光纤的定向耦合器的分光比  $C^{[8]}$  以及两偏振态的分光比差  $C_{\Delta}^{x-y}$ :

$$L_c^{xy}(\lambda) = \frac{\lambda}{2(n_{\text{even}}^{xy} - n_{\text{odd}}^{xy})}, \quad (1)$$

$$C^{xy}(\lambda) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{L_0}{L_c^{xy}(\lambda)}\right), \quad (2)$$

$$C_{\Delta}^{x-y}(\lambda) = C^x(\lambda) - C^y(\lambda), \quad (3)$$

其中,  $\lambda$  为波长,  $n_{\text{even}}$  与  $n_{\text{odd}}$  分别表示双芯光纤中偶模与奇模的有效折射率,  $L_0$  为耦合器中双芯光子晶体光纤的长度, 上标  $x$  与  $y$  表示  $x$  偏振态与  $y$  偏振态.

初步结构参数选取孔距  $\Lambda$  为  $6 \mu\text{m}$ , 使双芯光子晶体光纤具有与普通单模光纤相匹配的有效模场面积, 降低与普通单模光纤的接续损耗, 并使光纤的制作难度减小; 为了有效地避免高阶模式的出现, 根据光子晶体光纤的无尽单模理论选取  $f$  为  $0.4^{[1]}$ ; 同时选取  $f_c$  为  $0.45$ ,  $\Delta_c$  为  $-1\%$ ; 为了便于实现光纤耦合器的小型化, 中心调制区采用较小的椭圆孔, 以减小双芯光纤的耦合长度<sup>[11,12]</sup>, 选取中心调制椭圆孔  $f_x$  及  $f_y$  分别为  $0.4$  与  $0.15$ .

在上述结构参数下, 得到波长在  $1.55 \mu\text{m}$  处的  $x$  和  $y$  偏振的奇模与偶模的模场分布图, 如图 2 所示, 可知该双芯光子晶体光纤的模场分布相对分离, 有利于与单模光纤的接续.

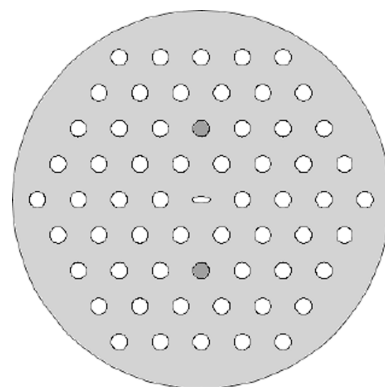


图 1 双芯光子晶体光纤横截面结构图

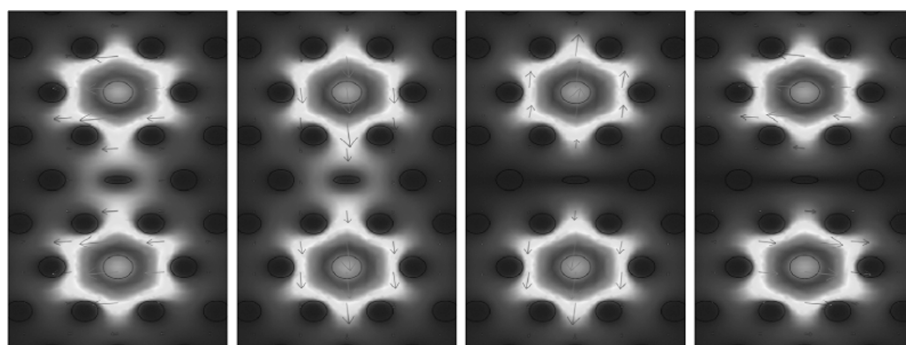


图 2 双芯光子晶体光纤模场分布图

### 3 结构参数对光纤耦合特性的影响

为了进一步优化光纤的光学特性,本部分研究图 1 所示双芯光子晶体光纤结构参数对光纤及基于光纤的耦合器的光学特性的影响规律.在上述初始结构参数的基础上,重点讨论空气孔间距、包层空气孔直径、低折芯区直径与折射率差、中心调制区椭圆空气孔的长轴与短轴等参数的影响.初始参数为:  $\Lambda = 6 \mu\text{m}$ ,  $f = 0.4$ ,  $f_c = 0.45$ ,  $\Delta_c = -1\%$ ,  $f_x = 0.4$ ,  $f_y = 0.15$ , 每次改变其中某一项参数,其他保持不变,研究该项参数对光纤及耦合器光学特性的影响.

#### 3.1 空气孔参数的影响

空气孔间距将直接影响光子晶体光纤的模场面积、制作难度等,为了设计出便于制作及易于与单模光纤接续的双芯光子晶体光纤,本部分首先研究空气孔间距对双芯光子晶体光纤的单芯模场面积的影响,假设孔距  $\Lambda = 5, 6, 7, 8, 9 \mu\text{m}$ , 其他参数不变,双芯光子晶体光纤中的单芯模场的等效面积随波长变化的曲线如图 3(a) 所示.由图可知,当孔距约为  $6 \mu\text{m}$  时,双芯光子晶体光纤的单芯等效模场面积在波长  $1.55 \mu\text{m}$  附近约为  $80 \mu\text{m}^2$ ,与普通单模光纤的模场面积接近,将有利于减小与普通单模光纤的接续损耗,同时孔距为  $6 \mu\text{m}$  的光子晶体光纤的制作难度相对较低.另外,通过图 3(a) 发现等效模场面积随着波长变大在逐渐减小,与普通单模光纤模场面积随着波长变长而增大的规律相反,这源于芯区掺氟,折射率较低,随着波长的增加,掺氟区与石英的折射率差变小,模场受掺氟低折区的影响也逐渐变小,因此随着波长增加,模场分布由掺氟低折区周围向掺氟低折区收缩,导致了模场面积的反常规变化.这也是使双芯光子晶体光纤耦合器实现宽带特性的一个关键原因.

图 3(b) 所示为不同孔距下对应的双芯光子晶体光纤的耦合长度,在此基础上制作的 50:50 耦合器中所需双芯光子晶体光纤的长度,设定分光比误差最大为 1%,选取耦合长度最高点使其分光比为 51%,则耦合器长度可通过 (2) 式变形得到如下公式:

$$L_0 = 2L_{\max} \arcsin(\sqrt{0.51})/\pi, \quad (4)$$

其中  $L_{\max}$  是双芯光子晶体光纤在全波段中的最长耦合长度.假设最长耦合长度对应的波长为  $\lambda_0$ ,

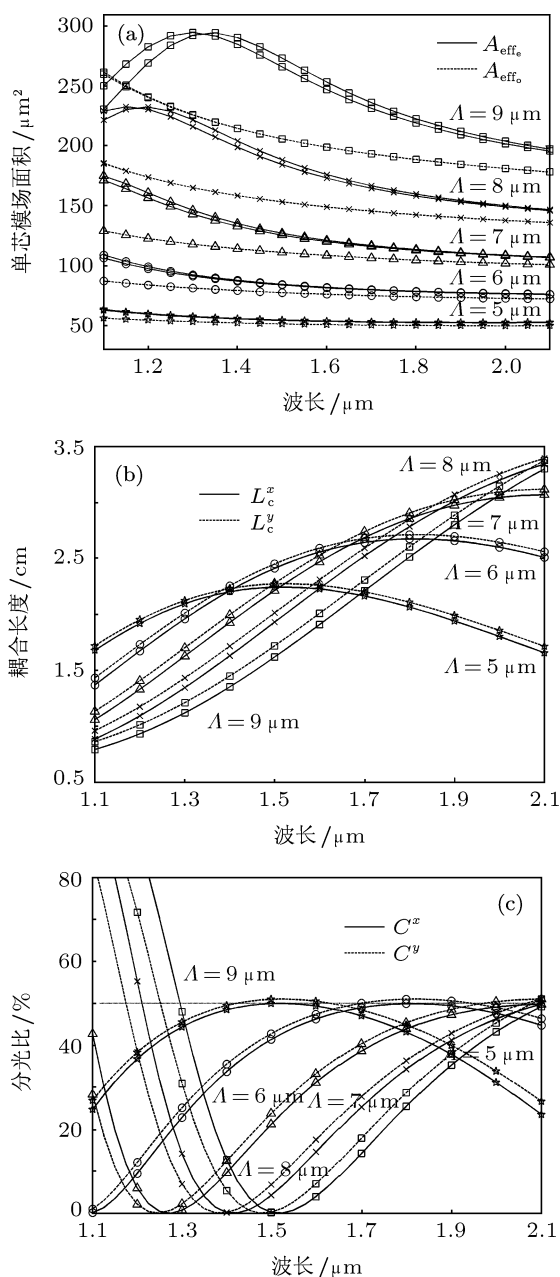


图 3 孔距对双芯光子晶体光纤的 (a) 单芯等效模场面积, (b) 耦合长度和 (c) 分光比的影响

则通过 (4) 式设计得到的耦合器分光比在波长  $\lambda_0$  处的分光比为 51%, 其他波长对应的分光比则可由 (2) 式得到, 结果如图 3(c) 所示. 由图可得, 耦合器分光比在波长  $\lambda_0$  处最大为 51%, 随着波长的变大或者变小都逐渐降低, 当耦合器分光比允许的误差为 1% 时, 则分光比大于 49% 的范围内都是有效地工作带宽, 而最大分光比 51% 对应的波长  $\lambda_0$  则可以定义为工作中心波长. 随着孔距变大, 最大耦合长度对应的波长也在变大, 相应的 50:50 耦合器的工作中心波长也逐渐变大, 这与上述模场面积的反常规变化规律原因一致, 也是由于掺氟低折区造

成的. 同时, 两偏振态的耦合长度与分光比随着孔距变大也逐渐变大, 即偏振无关特性变差. 因此, 从耦合器中心工作波长和偏振特性等方面考虑, 孔距设定在  $6\ \mu\text{m}$  是恰当的.

下面分析包层空气孔直径对双芯光子晶体光纤耦合器光学特性的影响规律, 设定包层空气孔直径与孔距比例  $f$  分别为 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 其他参数不变, 则双芯光子晶体光纤耦合长度和 50:50 耦合器的分光比随波长变化的曲线如图 4 所示. 由图 4(a) 可见, 包层空气孔直径变化对最大耦合长度对应的波长基本没有影响, 这与图 4(b) 相符. 但是, 包层空气孔直径对两个偏振态的耦合长度和分光比影响较明显, 包层空气孔直径越小, 双芯光子晶体光纤的偏振无关特性越好. 综合考虑限制损耗、制作难度等因素, 包层空气孔直径与孔距比例可选取为 0.4, 这样也可以保证光纤的无尽单模特性, 有效抑制双芯光子晶体中高阶模式的干扰.

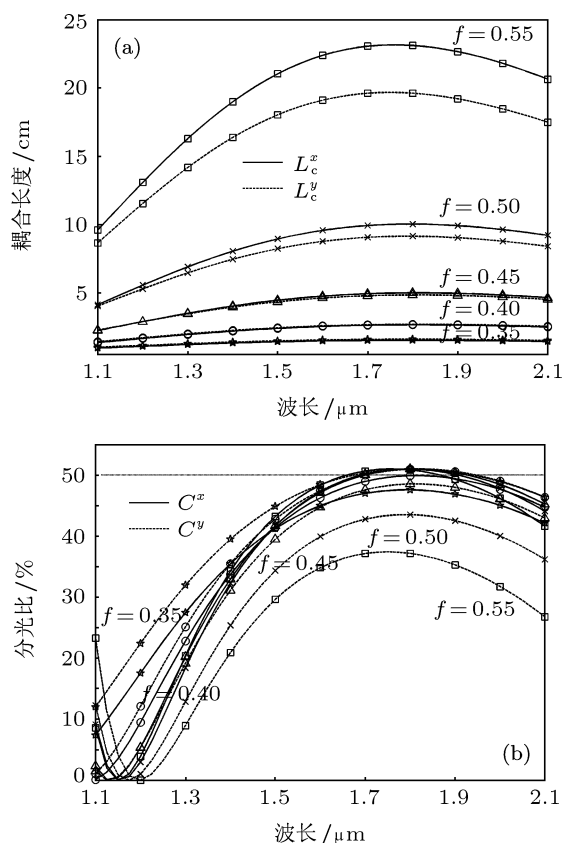


图 4 包层空气孔对 (a) 耦合长度和 (b) 分光比的影响

### 3.2 芯区的影响

在光纤设计中芯区结构的设计是至关重要的一环, 在本文提出的双芯光子晶体光纤中, 芯区由

中心掺氟的低折射率区和周围的纯石英区组成, 在光纤拉制过程中, 实心结构比空气孔结构更容易控制, 因此通过调整芯区掺氟低折区的直径与折射率差来实现的光学特性在光纤制作中能更好的保持. 下面首先研究芯区掺氟低折区直径对双芯光子晶体光纤耦合器光学特性的影响.

设定芯区掺氟低折区直径与孔径比例分别为 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 其他参数保持不变, 分析其对双芯光纤耦合长度与耦合器分光比的影响, 如图 5 所示. 由图可见, 芯区直径越大, 耦合长度绝对值越小, 同时最长耦合长度对应的波长越长. 此外, 芯区直径对双芯光子晶体光纤的偏振特性具有微调作用, 随着芯区直径变大, 两个偏振态之间的耦合长度的差值先变小后变大, 当芯区直径与孔距比例为 0.4 时, 两偏振态对应的耦合长度与分光比基本一致, 此时双芯光子晶体光纤具有非常好的偏振无关特性.

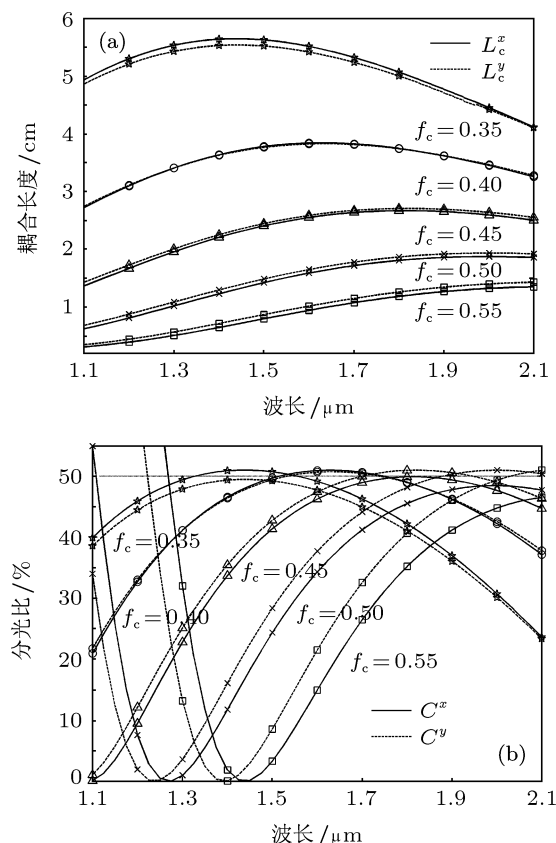


图 5 芯区直径对 (a) 耦合长度和 (b) 分光比的影响

双芯光子晶体光纤设计中, 与芯区相关的可控参数除了芯区直径外还有芯区的掺杂量, 下面分析掺氟低折区折射率差对双芯光子晶体光纤耦合器光学特性的影响. 设定芯区掺氟低折

区与纯石英区的折射率差分别为  $-0.6\%$ ,  $-0.8\%$ ,  $-1\%$ ,  $-1.2\%$ ,  $-1.4\%$ , 其他参数分别为  $\Lambda = 6 \mu\text{m}$ ,  $f = 0.4$ ,  $f_c = 0.45$ ,  $f_x = 0.4$ ,  $f_y = 0.15$ . 分析耦合长度与分光比等光学特性, 结果如图 6 所示. 由图可见, 低折区折射率差与芯区直径对光学特性的影响规律类似, 随着低折芯区掺杂量变大, 耦合长度绝对值越小, 同时最长耦合长度对应的波长向长波长区域偏移. 掺杂量对双芯光子晶体光纤的偏振特性也同样具有微调作用, 随着掺杂量变大,  $x$  偏振态的耦合长度与  $y$  偏振态耦合长度由相对较大变为相对较小, 这与芯区直径对偏振特性的影响规律一致. 芯区直径和掺杂量对工作波长的影响以及对偏振特性的微调作用有利于后续双芯光子晶体光纤的设计优化.

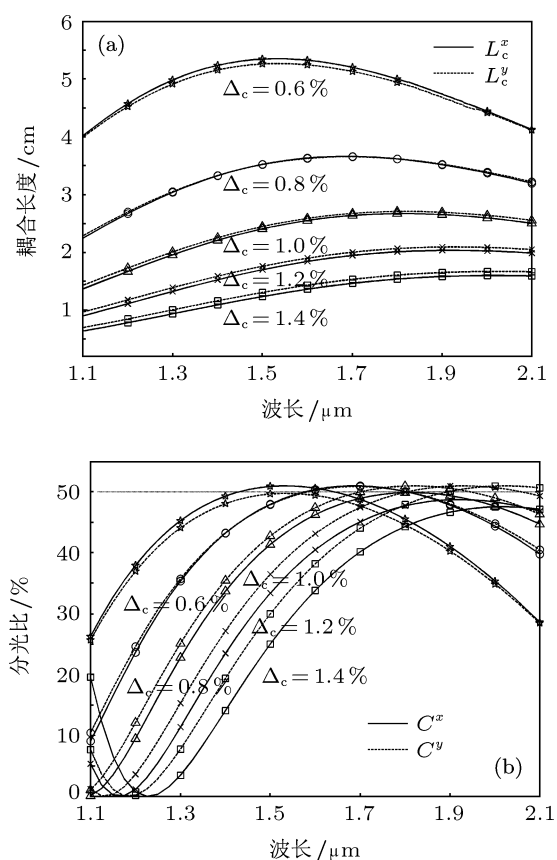


图 6 芯区掺杂量对 (a) 耦合长度和 (b) 分光比的影响

### 3.3 中心调制区的影响

双芯光子晶体光纤两芯子间的中心调制区采用椭圆形空气孔可以有效地调制双芯光子晶体光纤的偏振特性, 通过合理的设计, 可以使两偏振态的耦合长度与分光比在工作区间内基本相同, 从而

实现偏振无关特性. 下面分别研究中心调制区椭圆形空气孔的  $x$  轴长度与  $x$  轴长度对双芯光子晶体光纤耦合长度和分光比等光学特性的影响.

设定中心调制区椭圆形空气孔  $y$  轴长度与孔距比例为 0.15, 改变  $x$  轴长度与孔距比例分别为 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 其他参数保持不变, 研究其对耦合长度、分光比等光学特性的影响规律, 结果如图 7 所示. 从图 7 中可得知, 椭圆形空气孔的  $x$  轴越长, 耦合长度的绝对值也越长; 在椭圆形空气孔  $x$  轴改变时,  $x$  偏振态的耦合长度较  $x$  偏振态变化更明显, 因此通过调节椭圆形空气孔的  $x$  轴可以有效地调节双芯光子晶体光纤的偏振特性, 同时, 该结构参数还对工作波长有一定的影响.

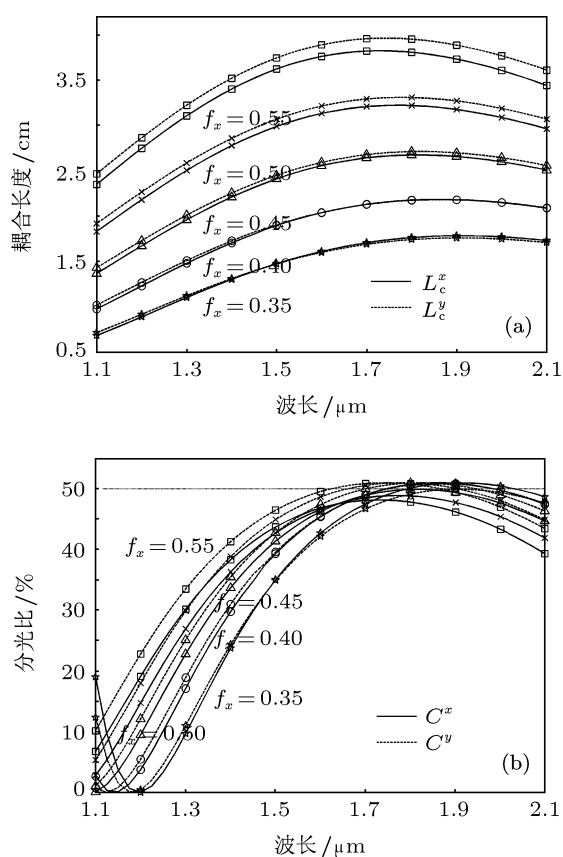


图 7 中心调制区椭圆形空气孔  $x$  轴长度对耦合长度和分光比的影响 (a) 耦合长度; (b) 分光比

设定中心调制区椭圆空气孔  $x$  轴长度与孔距比为 0.4, 改变  $y$  轴长度与孔距比例分别为 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 其他参数不变, 研究其对耦合长度、分光比等光学特性的影响, 结果如图 8 所示. 从图 8 中可得知, 椭圆形空气孔  $y$  轴长度变长对两芯子间能量的隔离作用变强使耦合长度的绝对值变大, 这

与  $x$  轴长度的影响一致, 但  $y$  轴长度对  $X$  偏振态的影响更为显著, 这与  $y$  轴长度对偏振特性的影响规律恰相反, 同时  $y$  轴长度的变化对工作中心波长影响不明显.

中心调制区作为双芯光子晶体光纤实现偏振无关特性的关键因素, 椭圆形空气孔的  $x$  轴与  $y$  轴长度对偏振特性的影响看似相反, 其实本质是一致的. 椭圆形空气孔的  $x$  轴与  $y$  轴长度变化实际上就是椭圆率  $e = f_x/f_y$  的变化: 椭圆率变大, 即  $x$  轴长度变大或者  $y$  轴长度变小,  $y$  偏振态耦合长度相对于  $x$  偏振态耦合长度变大; 椭圆率变小, 即  $x$  轴长度变小或者  $y$  轴长度变大, 则  $y$  偏振态耦合长度相对于  $x$  偏振态耦合长度变小. 换言之, 中心调制区椭圆空气孔的  $x$  轴长度相对越大, 对两芯子中  $y$  偏振态的能量隔离越强, 故  $y$  偏振态的耦合长度相对越大; 椭圆形空气孔  $y$  轴长度相对越大, 对两芯子中  $x$  偏振态的能量隔离越强, 故  $x$  偏振态的耦合长度相对越大. 这与光能量耦合传输的规律相符.

#### 4 工作带宽的扩展方案

通过上述分析可以发现, 双芯光子晶体光纤的孔距、包层空气孔直径、芯区直径、芯区掺杂量、中心调制区空气孔的椭圆率等参数主要影响的是双芯光子晶体光纤的耦合长度、偏振特性以及 50:50 耦合器的工作波长范围等参数. 虽然芯区掺杂在一定范围内可以展宽 50:50 耦合器的工作带宽, 但是从图 5 和图 6 可以发现, 芯区直径和芯区掺杂量对带宽的影响并不明显. 研究文献 [9] 中双芯光子晶体光纤耦合器超宽带的工作机理, 发现其中提到的双芯光子晶体光纤芯区两侧空气孔 (其中一侧为包层空气孔, 一侧为中心调制区) 不对称, 芯区中能量并没有均匀分布在低折区周围, 而是在不同的波长处具有不同的分布状态, 在整个波长区间中, 能量的分布主要有三种状态: 一是短波长区间, 能量主要集中在低折芯区附近的纯石英区; 二是中波长区间, 能量逐渐向低折芯区渗透; 三是长波长区间, 能量基本不受低折芯区的影响, 分布在整个芯区中. 而前文所分析光纤中芯区与周围包层空气孔都是对称结构, 导致能量分布只有上述三种状态中的后两种, 而第一种分布状态又对耦合长度随波长的变化趋势有很大的影响. 打破图 1 所示双芯光子晶体光纤芯区的六重对称特性有两种方法: 一是改变芯区周边六个包层空气孔的大小; 二是使低折

芯区偏移中心位置. 从光纤的制造工艺方面考虑, 方法一引入了不同直径的空气孔, 增加了制作难度, 方法二不涉及空气孔操作, 只需在光子晶体光纤预制棒堆制前制作出低折芯区偏移的毛细棒作芯区即可. 下面分析低折芯区偏移量对双芯光子晶体光纤耦合特性和分光比的影响.

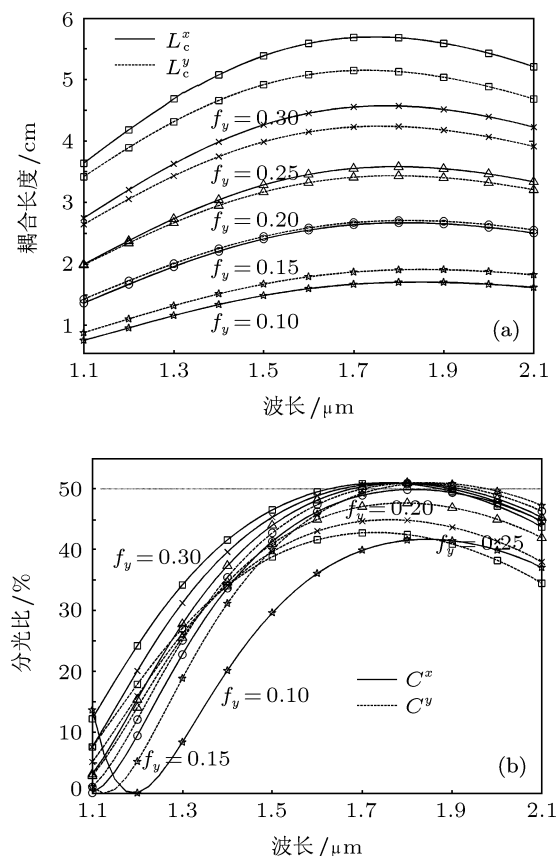


图 8 中心调制区椭圆形空气孔  $y$  轴长度对耦合长度和分光比的影响 (a) 耦合长度; (b) 分光比

在初始结构参数的基础上, 设定低折芯区在  $y$  方向上向靠近中心调制区方向偏移  $D_{\Delta}^1$  和向远离中心调制区方向偏移  $D_{\Delta}^2$  的偏移量分别为 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2  $\mu\text{m}$  和 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1  $\mu\text{m}$ , 研究其对双芯光纤耦合长度及耦合器分光比等光学特性的影响规律, 结果分别如图 9 和图 10 所示. 由图可以得知, 当低折芯区位置偏移时, 可以有效地调节耦合长度随波长变化的趋势, 而且短波长区域受到的影响比长波长区域更明显, 因此可以通过调节中心低折区的偏移量, 调整耦合长度随波长变化的关系曲线, 在恰当的偏移量处, 可以使耦合长度的工作区域大大的展宽. 并且由图 9(b) 和图 10(b) 可以发现, 这还可以有效地调节中心工作波长.

### 5 参数优化

通过上述分析,得到了双芯光子晶体光纤的结构对耦合长度、分光比等光学特性的影响规律如表 1 所示.

其中中心调制区  $x$  与  $y$  的变化可以归纳为一条:椭圆率越大,  $y$  偏振态耦合长度相对越长;椭圆

率越小,  $y$  偏振态的耦合长度则相对越短.

考虑光子晶体光纤的易控制与实用性,从易于制作、与单模光纤接续损耗低、容差性、工作波长与工作带宽等方面综合分析,参照表 1,我们对光纤结构参数进行了进一步优化,得到了四组较优的光纤结构参数及模场面积、50:50耦合器长度和工作波长范围、 $x$ 及 $y$ 偏振态的分光比差,如表 2 所示.

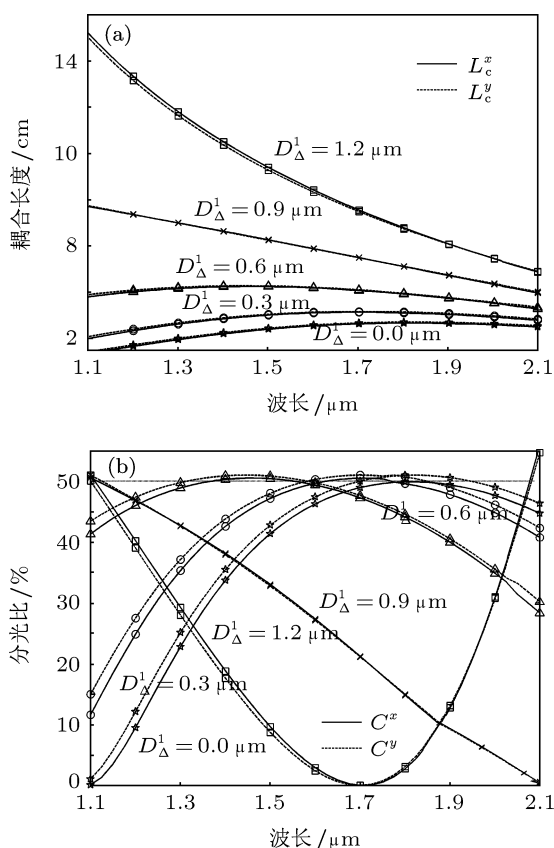


图 9 低折芯区向靠近中心方向的偏移量对耦合长度和分光比的影响 (a) 耦合长度; (b) 分光比

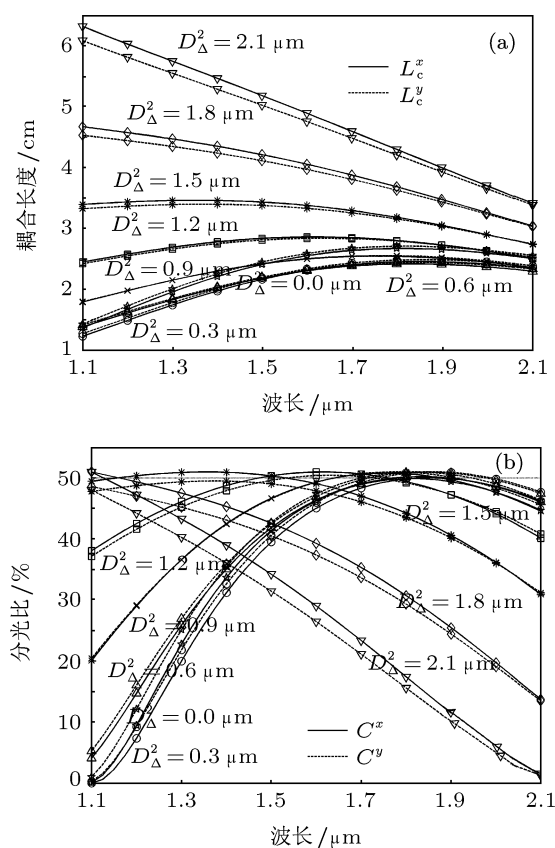


图 10 低折芯区向远离中心方向的偏移量对耦合长度和分光比的影响 (a) 耦合长度; (b) 分光比

表 1 双芯光子晶体光纤结构参数对光学特性的影响规律

光纤结构参数	耦合长度	耦合长度相对变化速率	耦合器中心波长	耦合器工作带宽
孔距变大	变长	基本一致	向长波长偏移	基本不变
包层空气孔直径变大	变长	$x$ 偏振态变化快	基本不变	基本不变
芯区直径变大	变短	$x$ 偏振态变化略快	向长波长偏移	基本不变
芯区掺杂量变大	变短	$x$ 偏振态变化略快	向长波长偏移	基本不变
中心调制区 X 变大	变长	$y$ 偏振态变化快	向长波长偏移	基本不变
中心调制区 Y 变大	变长	$x$ 偏振态变化快	基本不变	基本不变
芯区向中心偏移	变长	基本一致	向短波长偏移	先变大再变小
芯区远离中心	先变短再变长	基本一致	先向长波长后向短波长偏移	先变小后变大再变小

表 2 双芯光子晶体光纤较优结构参数

参数	孔距/ $\mu\text{m}$	$f$	$f_c$	$\Delta_c/\%$	$f_x$	$f_y$	芯区偏移量/ $\mu\text{m}$	单芯模场面积/ $\mu\text{m}^2$	耦合器长度/cm	工作波长范围/ $\mu\text{m}$	分光比差/%
参数 1	6	0.4	0.46	1.02	0.4	0.16	接近中心 0.64	73	2.15	1.26—1.62	1
参数 2	6	0.4	0.45	1.02	0.4	0.136	远离中心 1.42	60	1.44	1.225—1.675	0.5
参数 3	8	0.4	0.45	0.92	0.4	0.16	接近中心 1	118	4.21	1.2—1.7	1.2
参数 4	8	0.4	0.45	0.9	0.4	0.12	远离中心 2.2	93	2.43	1.0—1.8	0.5

对比四组光纤最优结构参数下的双芯光子晶体光纤的光学特性, 可以发现当芯区向远离中心的方向偏移时, 两偏振态的分光比误差小于芯区接近中心的情况. 同时这种情况时, 模场面积也相对较小, 耦合长度相对较短, 这是由于低折芯区远离中心调制区使双芯光纤的能量分布区更接近, 从而更加容易发生能量耦合. 本文提出的光纤结构中芯区周围各自有六个空气孔形成完整的包层结构, 因此能量只要进入六个空气孔的范围内, 即可起到限制作用. 当孔距大于  $6 \mu\text{m}$  时, 芯区周围六个空气孔限制的区域即可大于普通单模光纤的芯区区域, 与普通单模光纤接续后, 从单模光纤注入到双

芯光纤中的能量可以有效地被限制在芯区; 当能量从双芯光纤注入到单模光纤时, 则需要使双芯光纤的有效模场面积小于等于普通单模光纤的模场面积, 才能获得低接续损耗. 因此从与普通单模光纤接续方面来考虑, 参数 1 与 2 要优于参数 3 和 4, 参数 3, 4 的孔距较大, 导致模场面积也较大. 而参数 2 对应的耦合长度、工作带宽、偏振特性又优于参数 1, 综合上述可得参数 2 效果最优, 其典型光学特性如图 11 所示, 在该结构参数下能够满足接续损耗低、易于制作、偏振无关特性等要求, 并且其工作波长从  $1.225\text{--}1.675 \mu\text{m}$ , 覆盖了全通信波段.

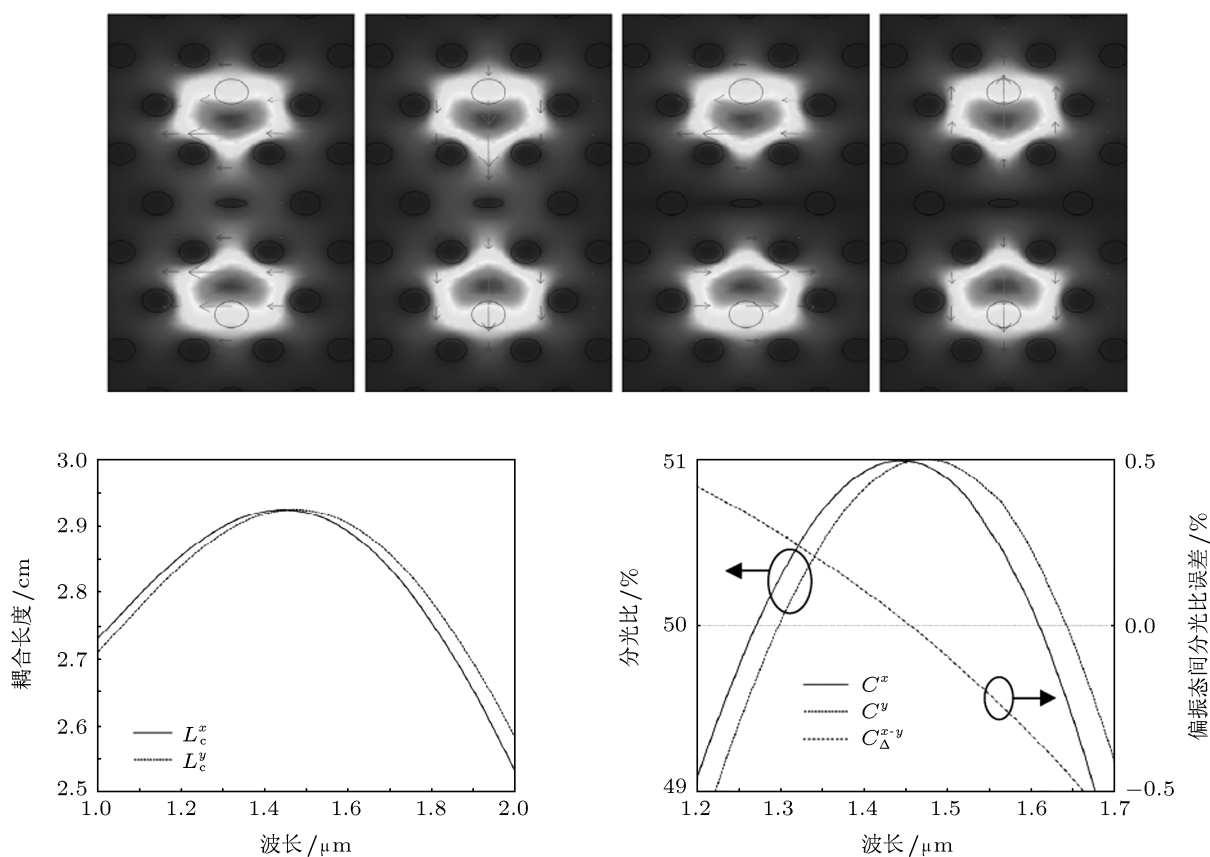


图 11 参数 2 对应的典型光学特性



## 6 结论

本文提出了一种新型宽带偏振不敏感双芯光子晶体光纤, 利用全矢量有限元方法分析了光纤结构参数对双芯光子晶体光纤光学特性的影响, 讨论了拓展双芯光子晶体光纤耦合器带宽的机理、提出了带宽拓展方案, 并进一步验证了该方案的有效性. 在此基础上得到了一组优化的双芯光子晶体光

纤结构参数, 满足易于制作、易于接续、接续损耗低等应用要求. 基于这种光纤设计的 50:50 耦合器可以在覆盖整个通信波段的 1.225—1.675  $\mu\text{m}$  波长范围内具有分光比误差小于 1%、两偏振态分光比误差小于 0.5% 的优良特性. 研究成果突破现有耦合器的工作带宽窄、波长依赖性强的限制, 为超大容量超高速率全光网络研究提供器件支撑.

- 
- [1] Birks T A, Knight J C, Russell P S J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [2] Bjarklev A, Broeng J, Bjarklev A S 2003 *Photonic crystal fibers* (Boston: Kulwer Academic Publishers)
- [3] 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]
- [4] Fu B, Li S Q, 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]
- [5] Liu S, Li S G, Fu B, Zhou H S, Feng R P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034217 (in Chinese) [刘硕, 李曙光, 付博, 周洪松, 冯荣普 2011 物理学报 **60** 034217]
- [6] Lagsgaard J, Band O, Bjarklev A 2004 *Opt. Lett.* **29** 2473
- [7] Varshney S K, Florous N J, Saitoh K 2006 *Opt. Express* **14** 1982
- [8] Florous N, Saitoh K, Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 7365
- [9] Lou S Q, Tang Z W, Wang L W 2010 *Applied Optics* **50** 2016
- [10] Koshiba M, Gurvilinear T Y 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 737
- [11] Saitoh K, Sato Y, Koshiba M 2003 *Opt. Express* **11** 3188
- [12] Mothe N, Philippe D B 2009 *Opt. Express* **17** 15778

# Design and optimization of a novel broadband and polarization-insensitive dual-core photonic crystal fiber coupler over the whole optical communication band\*

Wang Li-Wen Lou Shu-Qin<sup>†</sup> Chen Wei-Guo Lu Wen-Liang Wang Xin

(Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 27 December 2011; revised manuscript received 10 January 2012)

## Abstract

In this paper, a novel broadband polarization-insensitive dual-core photonic crystal fiber with elliptical central hole is proposed and the influence of its structural parameters on coupling characteristic is investigated in detail by the full-vector finite element method. Through optimizing the fiber structural parameters, broadband and polarization-insensitive characteristics are achieved over the whole optical communication band from 1.225  $\mu\text{m}$  to 1.675  $\mu\text{m}$ . The variation of coupling ratio is stabilized at  $50\% \pm 1\%$ , and the coupling ratio difference between  $x$  polarization and  $y$  polarization is less than 0.5% overall the wavelength range. Due to its relatively independent of cores and elliptical central hole and suitable structural parameters, this fiber meets the application requirements, that is, easy to fabricate, easy to splice and low splice loss. This research is freed from the current coupler limit: narrow bandwidth, wavelength dependence, polarization-sensitive, difficulty of fabricating, thereby provides the theoretical basis for the study of the large capacity high speed all-optical networks and multi-wavelength tunable fiber laser.

**Keywords:** dual-core photonic crystal fiber coupler, broadband characteristics, polarization-insensitive characteristics, fiber coupler

**PACS:** 42.79.Gn, 42.81.-i, 42.81.Qb, 42.81.Uv.

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No.2010CB328206), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977033 and 61177082), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2012YJS011).

<sup>†</sup> E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn