
一种基于三芯光子晶体光纤的宽带模分复用器的设计与研究*

王晓凯¹⁾ 李建设^{1)†} 李曙光¹⁾ 郭英¹⁾ 孟潇剑¹⁾ 汪国瑞²⁾ 王璐瑶¹⁾ 李增辉

¹⁾ 赵原源¹⁾ 丁钰鑫¹⁾

1) (燕山大学理学院, 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室、河北省微结构材料物理重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) (东北大学信息科学与工程学院, 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘要

本文提出了一种基于非对称三芯光子晶体光纤的宽带模分复用器。该器件主要是由位于光纤中心的可提供基模和高阶模传输的中心纤芯和分别位于中心纤芯两侧的可提供基模传输的两个旁芯构成。根据光耦合理论, 在输入端对三个纤芯分别输入 LP_{0l} 模式的光, 在传输过程中左旁芯的 LP_{0l} 模式的光将逐步向中心纤芯耦合并转换为 LP_{2l} 模式传输, 而右旁芯中的 LP_{0l} 模式的光则逐步耦合并转换为中心纤芯中的 LP_{3l} 模式来传输。通过对光纤结构的优化设计和光纤长度的选择, 使得在输出端同时完成旁芯 LP_{0l} 模向中心纤芯 LP_{2l} 和 LP_{3l} 模的最佳转换, 从而实现 LP_{0l} 、 LP_{2l} 和 LP_{3l} 三种模式的光在中心纤芯中的复用。反之, 若将该器件的输出端用作输入端则可以实现中心纤芯中三种模式的光向三个纤芯的解复用。本文利用有限元法和光束传播法进行了优化设计和仿真, 并将光耦合理论与超模理论相结合进行了分析计算, 结果表明在 $1.49\mu\text{m}$ - $1.63\mu\text{m}$ 的波段下, 该器件插入损耗最高为 0.72dB , 在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处器件插入损耗为最低值 0.543dB , 远低于大家普遍采用的 1dB 插入损耗的评价标准。较低的插入损耗也为级联型多芯光子晶体光纤模分复用器设计提供了可能。和现有的模分复用方案相比, 该器件的集成性更高, 受外界影响更小, 与多芯空分复用光纤搭配使用, 可以更好地提高模式转换效率和模式纯度, 降低耦合复杂度, 拓展通信容量。

关键词: 模分复用器, 光子晶体光纤, 插入损耗, 超模

PACS: 42.79.Sz, 42.79.Gn, 42.81.Qb, 42.82.Et

† 通讯作者. E-mail: jianshelee@ysu.edu.cn

基金: 国家重点研发计划(批准号: 2019YFB2204001), 国家自然科学基金(批准号: 12074331), 河北省自然科学基金(批准号: F2020203050, F2017203193)资助的课题。

1 引言

信息技术是推动社会进步的重要技术之一，信息现代化已成为推动社会发展的重要动力。特别是随着 5G、6G、物联网、远程诊疗和智慧城市等的兴起，大容量的信息化传输能力已成为信息现代化的必要基础，而干线的传输容量已近极限，因此大力发展新的空分或模分复用技术已成必然。基于光纤结构的模分复用系统是引入模式作为一个新的自由度来对传输信道进行扩容的一种技术，在系统中每一模式都被认为是一独立的信道。其本质是，在复用器的输入端将携带不同信息的信号经调制后以光的方式耦合到复用器的不同“模式”上，这些模式的光将以不同的路径在光纤内进行传输，且模式间互不干扰，然后在出射端利用解复用将光信号分离开并进行解调得到传输的信息。模分复用系统的核心在于模分复用器的设计，目前的技术主要有基于自由空间光路的相位屏、“光子灯笼”、全光纤型定向耦合器等，而工作波段和传输模式的插入损耗便是衡量复用器的关键参数。

在文献^[1]中提出了一种三模空间模分复用器，通过使用相位板对三个空间模式进行复用。该文献还提出了一种使用液晶空间调制的模分复用器。这种模分复用器尺寸较大且难以与后续长距离光纤模式复用波导对接，这使得难以适用于小型化和集成化模分复用系统。文献^[2]中提出了一种椭圆芯五模群选择性光子灯笼复用器，它可以支持 C 波段的 10 种空间模式的复用，通过对输入光纤束的综合几何优化以及采用两步拉锥制作方法，使得该复用器具有较好的工作性能。数值研究显示，该器件在 C 波段五种模式组的插入损耗为 0.1~0.38dB，模式转换效率控制在 -0.79dB~-0.19dB 之间。然而，这种复用器的绝热拉锥过程和耦合区折射率分布的精确控制仍然是较难把控的问题。文献^[3]中提出的基于非对称平面波导的多路复用/解复用器实现了模式复用/解复用和模式转换，但该多路复用器存在工作带宽较窄且和光纤拼接较为困难的问题。采用定向耦合方法的模分复用器具有模转换效率高、模消光比高、模串扰低的特点，可应用于模分复用系统的小型化和集成化^[4]，文献^[5]中提出了一种基于三维对称少模光纤 (FMF) 耦合器。在 C 波段内的 LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{21a} , LP_{21b} , LP_{02} 六种模式都获得了几乎平坦的响应，在发射的两种极化的低通模式下，平均插入损耗约为 1.6dB。考虑到各个模式的耦合距离不同，该器件采用的是较为常见的分段式耦合方法，即各个模式沿传输方向分次序耦合进入同一个波导中，保证每个耦合过程相对独立且互不干扰，但同时也使得该器件的设计长度较长，集成性欠佳。文献^[6]中提出了一种少模环芯光纤模分多路复用器，采用了纯石英环芯作为模式传输通道，实现了 LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} 三种模式的复用，其耦合效率在 C 波段高于 -1.39dB，环芯用作模式传输通道也有效的减小了 LP_{01} 与 LP_{11} 的模间串扰，但其实际制备方案并未给出。为了同时复用多个模式，也可以通过级联多个模式转换器（采用拉锥抛磨法或熔融拉锥法制作）制作一种全光纤型模分复用器^[7,8]。但这将额外的增加连接处损耗及制作复杂程度。

光子晶体光纤又称为微结构光纤，是一种折射率分布较复杂的光纤。由于光子晶体光纤具有极高的设计灵活性，使得可以通过包层结构的设计，以及利用基质材料的不同掺杂，可以实现更多不同的导光特性^[9]，并且对光传导模式和传导方式的调节和控制也

十分有利^[10,11]，近年来也备受关注。文献^[12]提出了一种可调谐的磁性流体填充的混合光子晶体光纤模式转换器，该转换器可以将折射率引导芯中的 LP_{1l} 模式转换为光子带隙引导芯中的 LP_{0l} 模式。仿真结果显示，该器件在 $1.33\mu\text{m}$ - $1.85\mu\text{m}$ 和 $1.38\mu\text{m}$ - $1.75\mu\text{m}$ 的波长范围内，耦合效率可分别达到 -0.457dB 和 -0.222dB 。文献^[13]提出了一种基于非对称双芯光子晶体光纤的可调谐模式转换器，该器件在双芯间的气孔中添加了液晶材料，利用双芯间的液晶材料的热光可调特性控制模式转换器的工作波长。在执行 LP_{0l} 与 LP_{1l} 之间的模式转换时，所提出的器件在 1278nm - 1317nm 的宽波长范围内显示出高转换效率。文献^[14]提出了一种基于三芯全固体光子晶体光纤 (AS-PBGF) 的模式转换器，仿真结果表明，选取合适的器件长度，该器件实现了 LP_{0l} 向 LP_{02} 和 LP_{1l} 模的同时转换及复用，且耦合效率高于 -0.46dB 。但其工作带宽较窄，折射率匹配条件仅在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处达成。当工作波长偏离 $1.55\mu\text{m}$ 时，耦合效率将会大大降低。

本文提出了一种基于非对称三芯光子晶体光纤的模分复用器，通过利用光子晶体光纤结构设计灵活的特性来实现多个模式在同一个器件内的模式同时转换和复用，有效缩短了器件长度并提高了器件设计的集成性。通过调整掺杂棒的材料折射率、空气孔的排布和直径大小，在光子晶体光纤中设计了三个局域光传输的纤芯，并利用有限元方法计算并优化旁芯和中心纤芯的折射率匹配关系，再利用光束传播法实现了 LP_{0l} 模从两个旁芯分别向中心纤芯的 LP_{2l} 和 LP_{3l} 模的转换仿真，从而完成了中心纤芯在输出端对 LP_{0l} ， LP_{2l} ， LP_{3l} 三个模式的复用。数值仿真表明，在 $1.49\mu\text{m}$ - $1.63\mu\text{m}$ 的波段下，该器件的模式插入损耗最高为 0.72dB ，在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处器件插入损耗为最低值 0.543dB ，远低于模分复用器 1dB 插入损耗的评价标准。该器件充分发挥了光子晶体光纤设计灵活的特性，更小的芯间距使得光耦合发生时能量转移所产生的基底损耗更低，耦合效率更高；宽的工作波段且覆盖常见通信波长 $1.55\mu\text{m}$ ；器件的最小长度仅为 4.9mm 且输出端口与光纤模式复用波导尺寸相近易于熔接，更适用于小型化和集成化模分复用系统。

2 光子晶体光纤模分复用器的工作原理

模分复用器从原理上来讲主要完成两个功能。首先是模式调制功能，将携带不同信息的电磁波信号转换成不同空间相位的电磁波信号，即“模分”；其次是模式的复用功能，即将不同空间相位的电磁波信号输入到同一个波导实现同时传输并互不干扰。

本文所提出的光子晶体光纤模分复用器中存在三个相对独立的纤芯，其中中心纤芯可看作模式复用波导，而两个旁芯则看作模式调制波导。该器件的模式调制部分的工作原理与定向耦合器相同，都为相位匹配原理。

光纤中的耦合波方程^[15]为：

$$\begin{aligned}\frac{dA_1(z)}{dz} &= -j\beta_1 A_1(z) + jK_{12} A_2(z) \\ \frac{dA_2(z)}{dz} &= -j\beta_2 A_2(z) + jK_{21} A_1(z)\end{aligned}\quad (1)$$

其中， K_{12} 和 K_{21} 是耦合系数，耦合系数的大小直接影响两个波导间的功率耦合。

假设 $Z=0$ 时， $A_2=0$ ，表示开始时波导 2 没有光传播，联立求解式(1)可得：

$$A_2(L) = jK_{12} \int_0^L A_1(z) e^{j(\beta_2 - \beta_1)z} dz \quad (2)$$

上式表示为，经过 L 的传播距离后，波导 2 中所建立的光波场， $e^{j(\beta_2 - \beta_1)z}$ 是一个震荡因子，因而只有当 β_1 和 β_2 相近时， $A_2(L)$ 才能是一个有效值，模式有效折射率表示为

$$n_{eff} = \beta\lambda / 2\pi \quad (3)$$

即模式有效折射率相近的两个模式间的能量会互相转移，完成模式的转换，即相位匹配原理。经过推导，可以得到两个波导中的传播功率为

$$\begin{aligned} P_1(z) &= 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{K}{F}z\right) \\ P_2(z) &= F^2 \sin^2\left(\frac{K}{F}z\right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $F^2 = 1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4K^2}$ ，表示波导间耦合的最大功率。由式(4)可知，光在两个波导中发生耦合时，能量随着传输方向 Z 发生周期性的传递，能量从波导 1 到波导 2 所传输的最短距离称为耦合长度。由耦合波方程(1)及耦合功率方程(4)可以看出，若想使得功率全部转换，耦合长度需要满足下式：

$$L = \frac{\pi/2}{\sqrt{K_{12}K_{21}}} \quad (5)$$

本研究所设计的模分复用器模型为：在输入端对三个纤芯分别输入一个基模光，而后根据相位匹配原理，在输出端，左旁芯的基模将耦合到中心纤芯中并转换为高阶模传输，而右旁芯中的基模则转换为中心纤芯中的另一高阶模，从而在输出端实现三个模式在中心纤芯中的复用。由公式(5)可知，由于不同模式转换间的耦合系数不同，所以两个旁芯向中心纤芯中的模式转换所需的耦合长度也就不同。为了达到更好的模式复用效果，需要截取合适的光子晶体光纤长度，使该长度同时满足两旁芯向中心纤芯能量耦合的最大功率输出。

3 器件的结构优化及数值仿真

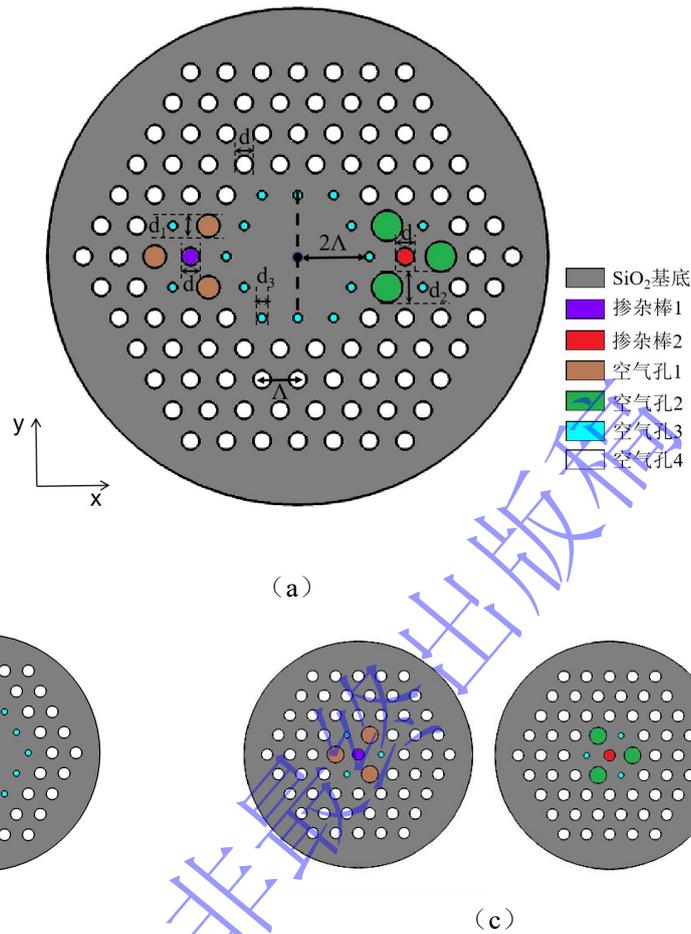


图 1 (a)三芯光子晶体光纤模分复用器剖面结构；(b)分体设计的中心纤芯波导剖面结构；(c)分体设计的旁芯波导剖面结构

Fig. 1. (a) Profile structure of three core PCF mode division multiplexer ;(b) Section structure of central core waveguide designed by split ;(c) Section structure of side core waveguide designed by split

本文所设计的三芯光子晶体光纤模分复用器的剖面结构如图 1(a)所示，复用器整体由 SiO_2 基底、空气孔和掺杂棒构成，且空气孔和掺杂棒的几何中心由内及外依次分布于五个正六边形上。其中，最内层正六边形的每条边上依次设置三个几何中心，由内及外依次增加一个，并所有几何中心中任意两个相邻的中心之间的间距均设置为 $\Lambda=5\mu m$ 。空气孔 3 围起来的区域构成模分复用器的中心纤芯，两根高折射率掺杂棒周围的六个大小间隔排布的空气孔围起来的区域分别构成了左右两个旁芯。空气孔 4 的直径 $d=2.5\mu m$ 保持不变，起到整体降低包层折射率，实现在全内反射作用下的纤芯限光作用。围绕在每根掺杂棒周围的三个空气孔 1（或 2）和三个空气孔 3 的几何中心分别呈正三角形排列，这样大小孔间隔排布的包层结构既有效减小了旁芯的双折射现象，避免在模式转换过程出现强的偏振相关性^[16]，又科学设置了旁芯向中心纤芯进行能量耦合和模式转换的传输通道，是一种简单高效而有意义的设计。同时空气孔 1、2 和 3 还起到调节旁芯和中心纤芯的模式有效折射率 (n_{eff}) 的作用，实现旁芯基模在特定波长向中心纤芯的特定高阶模式进行相位匹配条件下的模式转换。两根掺杂棒直径保持一致且等于空气孔 4 的直径 d ，这在一定程度上降低了制备难度。基底材料 SiO_2 的折射率由 Sellmeier 公式表达^[17]

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{j=1}^3 \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \quad (6)$$

式中， B_1, B_2 和 B_3 分别为 0.6961663、0.4079426 和 0.8974794； λ_1, λ_2 和 λ_3 分别为 0.068409、0.1162414 和 9.896161（单位： μm ）， $\lambda_j = 2\pi c/\omega_j$ ， ω_j 为光波共振频率， c 为真空中的光速。

在图 1(a) 中，由于对称分布的两个旁芯相距较远，且芯与芯之间在直线路径上还存在位于器件中心的中心纤芯及其近邻的两个调节气孔，因此其芯间串扰可以忽略。这样就使得某一旁芯的基模向中心少模纤芯中特定高阶模的转换，仅仅通过单独调节该旁芯的基于结构参数的波导形状和基于材质组合的材料属性就可以完成器件设计。由于在折射率引导型光子晶体光纤中，紧邻纤芯的一层空气孔对光纤属性的影响最大，所以忽略旁芯间的相互影响，采用分体式设计、组合化装配可以大大简化设计难度，提高设计灵活性，本文研究采用了如图 1(b) 和 (c) 所示的分体式设计思路。其中，图 1(b) 为分体设计的中心纤芯的波导剖面结构，图 1(c) 为分体设计的（左、右）旁芯波导的剖面结构。在图 1(b) 中，中心纤芯的模型被简化为由一层空气孔 3 和两层空气孔 4 组成的波导模型；而在图 1(c) 中，两个旁芯的模型则被简化设计为由一根掺杂棒 1（或 2）、一层由三个空气孔 3 和三个空气孔 1（或 2）交替排列的空气孔组成的内层气孔、以及由三层空气孔 4 组成的外层气孔组成的波导模型。

首先，设计并仿真中心纤芯的结构及属性。在图 1 所示的结构中，中心纤芯外层空气孔起到的作用除了将光纤分割成三个独立的波导外，旁芯和中心纤芯水平连线上的空气孔 3 还位于旁芯向中心纤芯进行能量耦合和模式转换的主要传输通道上。为了增强相邻波导中的模式耦合效果，在满足相位匹配条件时，应使得光耦合发生时能量转移通畅，提高耦合效率，因此中心纤芯外的最内层空气孔直径不能太大。本文选取空气孔直径 $d=2.5\mu\text{m}$ ， $d_3=1.3\mu\text{m}$ 作为基础参数，对图 1(b) 的结构利用有限元方法进行了计算仿真，得到了不同模式下的有效折射率随波长的变化关系。图 2 为中心纤芯的 LP_{21} 和 LP_{31} 模式的有效折射率随波长的变化关系。图中可见，这两个模式的有效折射率差值在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 附近的研究波段内均满足 $\Delta n_{eff} > 0.001$ ，说明这两个模式可以很好地抑制模间串扰，有利于提高模式消光比，从而实现稳定传输^[18]。经分析研判，本结构参数下的 LP_{21} 、 LP_{31} 模式符合设计预期，因此确定这两个模式分别为左、右旁芯向中心纤芯进行转换复用的模式。考虑到光纤结构的对称性以及左右旁芯向中心纤芯复用时的能量传输方向，以下所有计算均考虑 x 偏振方向下的情况。

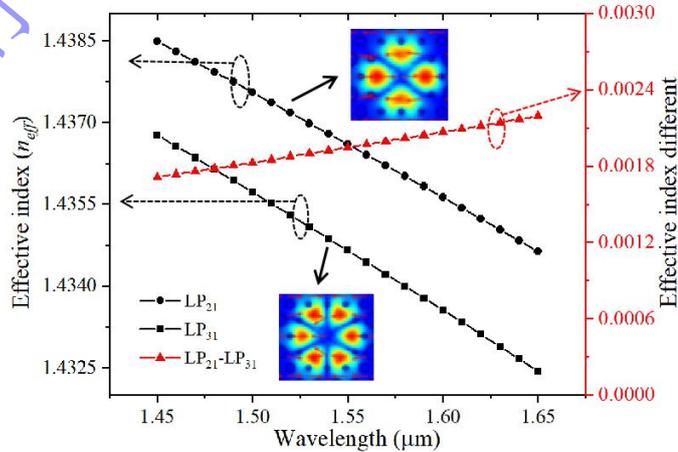


图 2 中心纤芯中 LP_{21} 和 LP_{31} 模式的有效折射率以及两模式间的有效折射率差 Δn_{eff} 随传输波长的变化关系
Fig. 2. The relationship between effective refractive index of LP_{21} and LP_{31} modes in central core, effective

refractive index difference Δn_{eff} of two modes and the transmission wavelength

上文已经确定了中心纤芯波导的结构，下面，进行旁芯的结构设计及参数优化。为了实现旁芯基模与中心纤芯待转换高阶模的宽带相位匹配，我们首先对图 1(c) 所示的旁芯波导进行不同结构参数调控下的仿真，首先找到单一参数变化对旁芯基模有效折射率的影响规律，然后再利用规律来对旁芯结构进行设计和优化。具体地：

首先，采用有限元法对旁芯波导的基模有效折射率进行计算，仿真过程采用单一变量原则，在波长 $1.55\mu\text{m}$ 处，固定旁芯掺杂棒的折射率差（折射率差定义为旁芯掺杂棒与光纤基底材料石英的折射率差）为 0， d_3 保持为 $1.3\mu\text{m}$ ，计算得到在不同 d_1 条件下的基模有效折射率随波长的变化关系如图 3 (a) 所示。将曲线进行拟合之后，可以发现随着 d_1 的增大，旁芯基模的有效折射率曲线位置下移，斜率增大。然后固定空气孔直径 $d_1=3.5\mu\text{m}$ ， d_3 保持为 $1.3\mu\text{m}$ 计算得到在不同纤芯掺杂棒折射率差的条件下的基模有效折射率随波长的变化关系如图 3 (b) 所示。对曲线进行拟合之后，可以发现随着纤芯掺杂棒折射率差的增大，基模的有效折射率曲线位置上移，而斜率的变化则不明显。

基于以上规律，先调整旁芯内层空气孔 1（或 2）的直径 d_1 （或 d_2 ）使旁芯基模的有效折射率曲线与中心纤芯待转换高阶模的有效折射率曲线斜率相近，这样更加有利于实现宽带相位匹配；再通过调整旁芯掺杂棒的折射率差使旁芯基模与中心纤芯待转换高阶模的有效折射率在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处相等，这样两条斜率高度接近的模式有效折射率曲线在 $1.55\mu\text{m}$ 处重合，就可以实现旁芯基模与中心纤芯高阶模在以波长 $1.55\mu\text{m}$ 为中心的较宽带宽内都能实现相位匹配或准相位匹配。

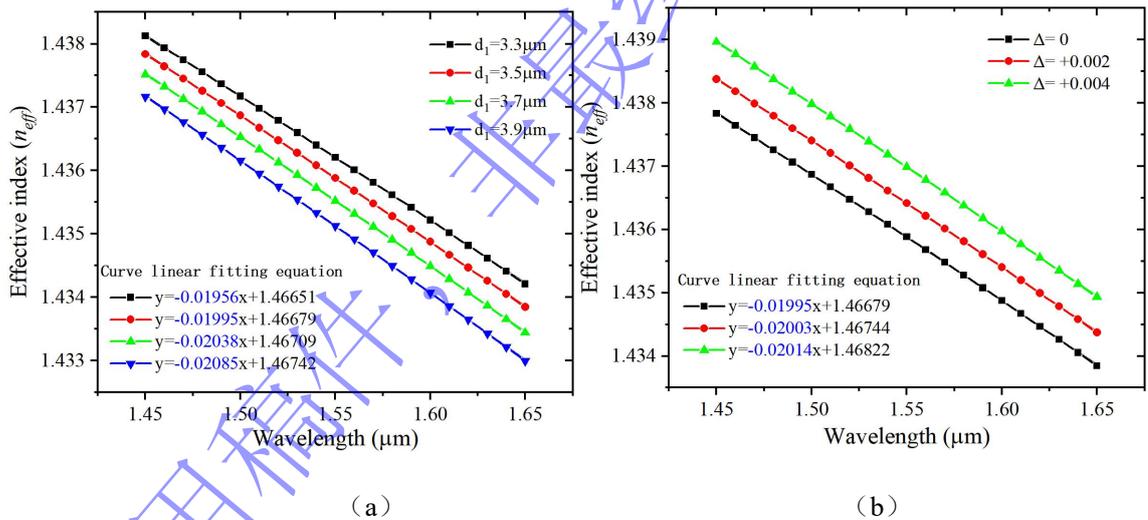


图 3 (a) 不同 d_1 条件下旁芯基模的有效折射率随波长的变化关系；(b) 不同折射率差条件下旁芯基模的有效折射率随波长的变化关系

Fig. 3. (a) The relationship between the effective refractive index of the side core mode and the wavelength under different d_1 conditions; (b) The relationship between the effective refractive index of the side core mode and the wavelength under different refractive index difference of the doped rod

基于以上分析，我们大致确定了参数 d_1 ， d_2 的取值区间，本文选择了其中的几个参数进行计算仿真并将结果与中心纤芯 LP_{21} ， LP_{31} 模的有效折射率随波长的变化曲线进行拟合后的对比，如图 4(a) 所示。图中表明，当左旁芯外层空气孔 1 的直径 $d_1=3.2\mu\text{m}$ 时，左旁芯基模的有效折射率曲线的斜率为 -0.01934，与中心纤芯 LP_{21} 模的有效折射率曲线斜率 -0.01929 最接近。当右旁芯外层空气孔 2 的直径 $d_2=4.2\mu\text{m}$ 时，右旁芯基模的有效折射率曲线的斜率为 -0.02165，与中心纤芯 LP_{31} 模的有效折射率曲线斜率 -0.02164 最接近。至此，本文确定了参数 $d_1=3.2\mu\text{m}$ ， $d_2=4.2\mu\text{m}$ 。在上述的结构基础之上，通过扫描旁

芯中掺杂棒折射率差，本文得到了在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处，满足旁芯基模与中心纤芯待转换模相位匹配条件的旁芯掺杂棒折射率差的取值，如图 4 (b) 所示。图 4 (b) 表明，当左旁芯掺杂棒 1 折射率差取值为 0.0009 时，左旁芯基模与中心纤芯 LP_{21} 模的有效折射率在 $1.55\mu\text{m}$ 处相等，当右旁芯掺杂棒 2 折射率差取值为 0.0007 时，右旁芯基模与中心纤芯 LP_{31} 模的有效折射率在 $1.55\mu\text{m}$ 处相等。当旁芯基模与中心纤芯待转换模式在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处相位匹配时，斜率相近的两条模式有效折射率曲线也就在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 附近的计算波段内十分接近于重合，从而达成了在中心波长附近的宽带相位匹配或准相位匹配，如图 4(c) 所示。

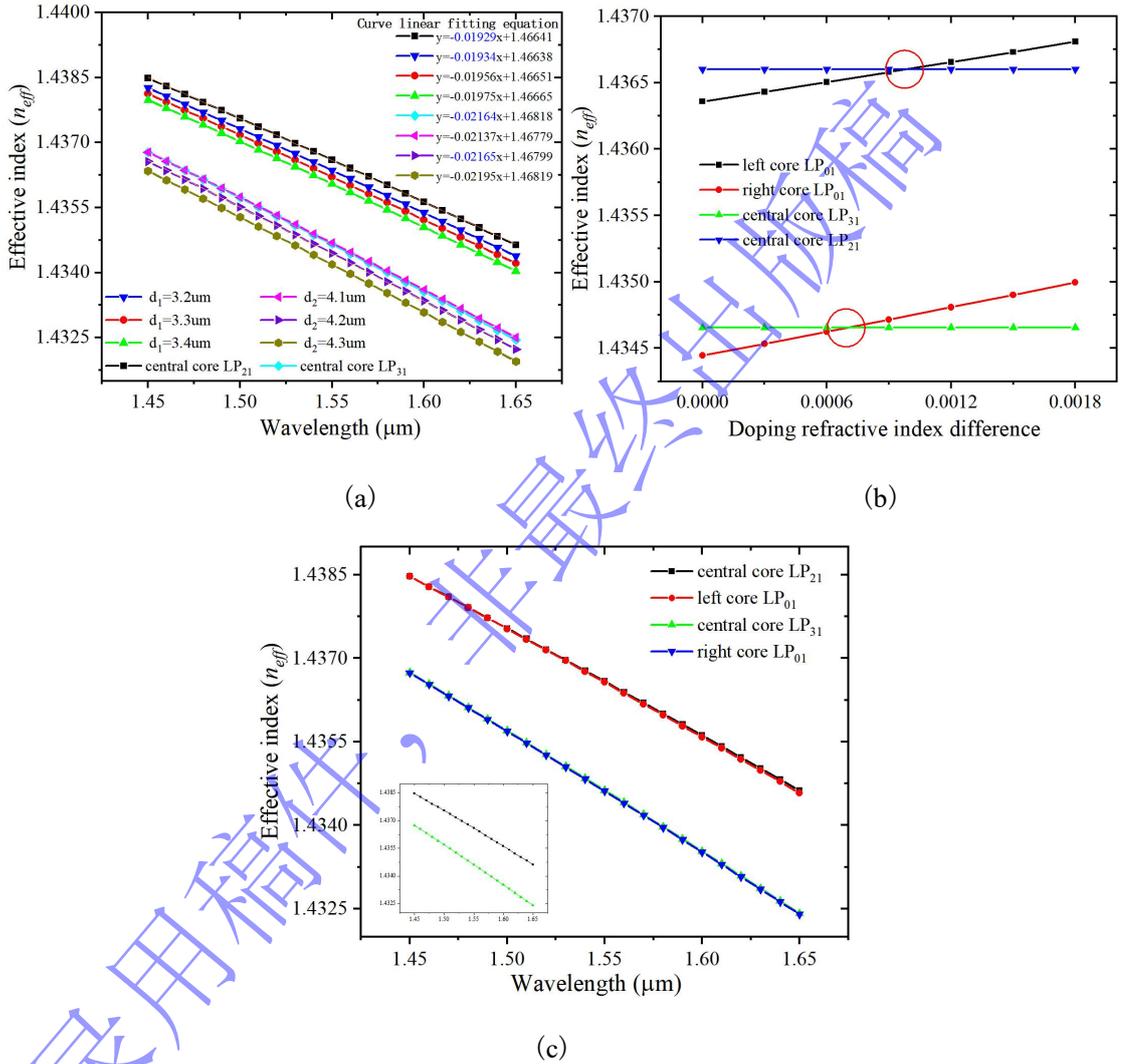


图 4 (a) 不同 d_1 , d_2 条件下旁芯基模的有效折射率随传输波长的变化关系; (b) $1.55\mu\text{m}$ 波长下旁芯基模的有效折射率随掺杂棒折射率差的变化关系; (c) 旁芯基模与中心纤芯各对应待转换模发生相位匹配;

Fig. 4. (a) The relationship between the effective refractive index of the side core fundamental mode and the transmission wavelength under different d_1 and d_2 conditions; (b) The relationship between the effective refractive index of the side core fundamental mode and the refractive index difference of the doped rod at $1.55\mu\text{m}$ wavelength; (c) Phase matching occurs between the basic mode of the side core and

the corresponding mode to be converted of the central core;

4 超模理论下的模式复用模型

结合超模理论研究发现, 当在光子晶体光纤中的两个纤芯间发生光耦合并伴随能量转移时, 这两个纤芯会在光传播过程中激发出超模^[19], 即一种在两个纤芯中同时存在光场的模式。超模又分为偶模和奇模, 它们的电场振幅完全相同, 但偶模在这两个纤芯中所存在的模场相位相同, 而奇模则在这两个纤芯中所存在的模场的相位相差为 π 。图 5 所示的超模模斑的电场线分布表明, (b) (d) 模式中旁芯和中心纤芯的光场相位是相同的, 所以称它们为偶模; (a) (c) 中旁芯和中心纤芯的光场之间存在相位差 π , 将它们称为奇模。在超模的三维视图中, 相位差为 π 的光场能量分布于以 XY 截面为能量 0 点的正负两个方向上, 相位相同的光场能量则分布于 XY 截面的同侧。当光纤中偶模与奇模同时传播时会存在一个光场叠加关系, 即奇模与偶模光场相位相同的 a 纤芯能量增加 (这里将发生光耦合效应的双芯称为 a 纤芯和 b 纤芯), 光场存在相位差 π 的 b 纤芯能量叠加后减小。偶模与奇模的传播常数分别为 β_e 和 β_o , 由于偶模与奇模的传播常数不同, 波速不同, 在传播过程中它们之间相位差会逐渐增大。当相位差增大到 π 时, a 纤芯的奇模与偶模的光场由一开始的同相变为相位差为 π , 而 b 纤芯的奇模与偶模间的光场相位差则由 π 变为 0, 因此光能量理论上会全部由纤芯转移到 b 纤芯, 从而完成了一次模式间的耦合转换。随着传输距离的增加, 光能量又会从 b 纤芯转移回 a 纤芯, 从而在 a 、 b 两个纤芯之中形成往复振荡。由超模理论, 耦合长度也可定义为光能量全部从双芯中的一个纤芯转移到另外一个纤芯所需要的传输距离, 可表示为^[20]:

$$L_c = \frac{\lambda}{2(n_e - n_o)} \quad (7)$$

式(7)中 n_e 和 n_o 分别代表偶模与奇模的模式有效折射率。将本复用器的奇、偶模模式有效折射率代入到上式中进行计算, 可得到中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处, 左旁芯基模转换为中心纤芯 LP_{21} 模的耦合长度为 4.3mm , 右旁芯基模转换为中心纤芯 LP_{31} 模的耦合长度为 5.8mm 。

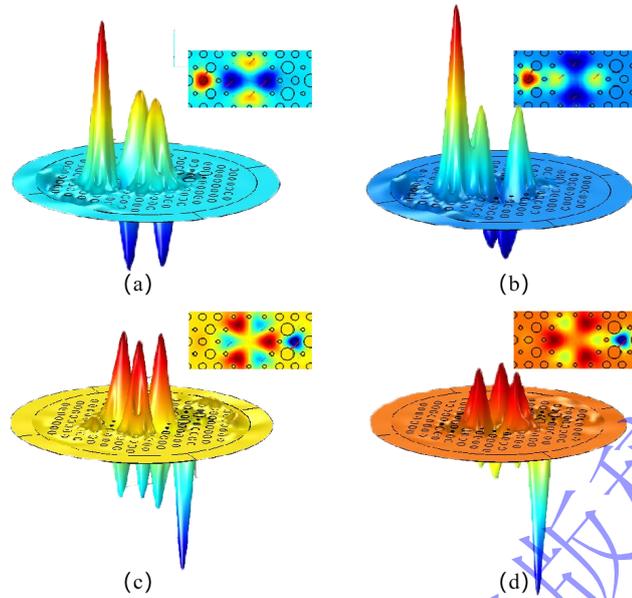


图5 三维与二维绘图下的超模 (a) LP_{01} - LP_{21} 奇模 (b) LP_{01} - LP_{21} 偶模 (c) LP_{01} - LP_{31} 奇模 (d) LP_{01} - LP_{31} 偶模

Fig. 5. Supermodes in 3D and 2D drawing groups (a) LP_{01} - LP_{21} odd mode (b) LP_{01} - LP_{21} even mode (c) LP_{01} - LP_{31} odd mode (d) LP_{01} - LP_{31} even mode

5 复用器的传输特性分析

下面采用光束传播法对该光子晶体光纤进行通光仿真来研究其传输特性，如图6所示。由于中心纤芯复用 LP_{01} 模采用直接通入的方法，所以仿真时仅考虑两旁芯通入基模光的情况。波长选在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处，计算长度设定为 8mm ，该计算长度既能保证其大于旁芯与中心纤芯发生光耦合的耦合长度又可以尽量减少计算耗时。

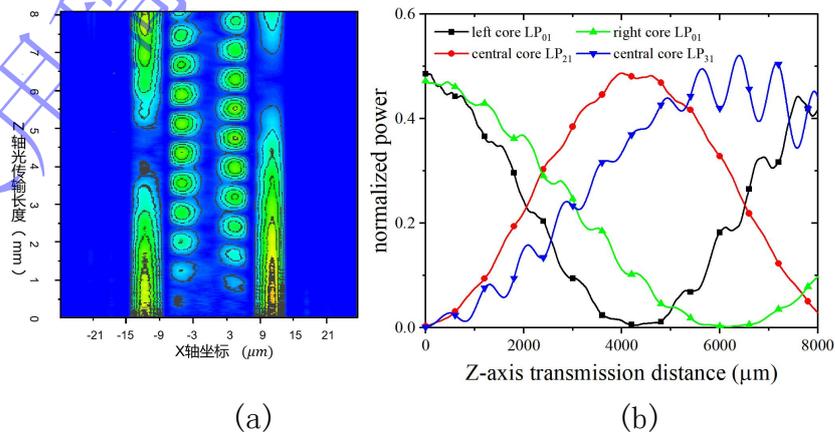


图6 功率监视器下的模式转换复用过程 (a) 等高曲线绘图 (b) 能量曲线绘图

Fig. 6. Mode conversion multiplexing process under power monitor (a) contour plot (b) energy plot

图6 (a) 等高能量曲线图从 XZ 截面方向展示了该器件的 LP_{21} 与 LP_{31} 模式的转换复用过程，图6 (b) 则将监测到的左右旁芯基模与中心纤芯 LP_{21} 与 LP_{31} 模的功率以曲

线图的形式展示出来。如图 6 (b) 所示, 在 $Z=0$ 即光源入射处, 旁芯中存在稳定的基模, 且两个纤芯中的各自能量大小均以归一化的 0.5 来表示。此时中心纤芯中的 LP_{2l} 和 LP_{3l} 两个模式能量为零, 随着传输距离增加, 左旁芯的基模先开始向中心纤芯中的 LP_{2l} 模转换, 随即右旁芯的基模也开始向中心纤芯中的 LP_{3l} 模转换, 当传输距离达到左旁芯基模向中心纤芯 LP_{2l} 模转换的耦合长度 4.4mm 时, 左芯中的能量完全消失, 而右旁芯尚未完成向中心纤芯的能量转移, 直到传输距离等于 6.2mm 时才完成了全部的能量转移。但其实在 5.8mm 时, 右旁芯的大部分能量就已经完成了向中心纤芯的耦合转移, 这与超模理论的计算结果是一致的。传输距离等于 6.2mm 时, 左旁芯中又出现了一部分转换回基模的能量。由于左、右旁芯向中心纤芯的两个模式转换的耦合长度不同, 会导致在选取的传输长度下两个模式转换的能量转移效率不同, 左右旁芯会分别以自己的耦合长度为传输周期来各自完成能量在旁芯与中心纤芯间的完全互换转移。因此, 选取合适的传输长度作为器件长度十分重要, 接下来本文将插入损耗与模式转换效率这两个指标来确定器件长度这一参数。

模分复用器的插入损耗是衡量该器件性能的主要指标, 插入损耗以输入和输出的能量比值为基准来进行表示, 具体的表达式^[21]为

$$IL = 10 * \lg \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (8)$$

在研究时, 将在 Z 等于零处旁芯中的输入总能量作为 P_{in} , 在确定的传输长度 (即器件长度) 处的中心纤芯中的总能量作为 P_{out} 来进行计算。模式转换效率也是衡量模分复用器性能的一个重要参数, 其表达式^[22]如下

$$C = 10 * \lg \frac{P_{LP_{mn}}}{P_{input}} \quad (9)$$

仿真时 P_{input} 定义为旁芯的输入能量, $P_{LP_{mn}}$ 定义为在传输长度处旁芯基模所对应转换的 LP_{mn} 高阶模的输出能量。

我们分别计算了在 1.45 μ m-1.65 μ m 波段下的选取不同器件长度时的器件插入损耗, 如图 7 (a) 所示。随着器件长度的增加插入损耗曲线的波谷位置发生了蓝移, 这主要是由于两部分模式转换的最佳耦合长度存在差距导致的, 而器件的插入损耗的高低又是和两部分模式转换的效率有直接关系的。通过分析, 我们选取了在中心波长 1.55 μ m 处插入损耗最低时所对应的传输长度 $L=4.9$ mm 作为器件长度。数值模拟结果表明在 1.49 μ m-1.63 μ m 的波段下, 该器件插入损耗最高为 0.72dB, 远低于模分复用器 1dB 插入损耗的评价标准, 插入损耗最低为中心波长 1.55 μ m 处的 0.543dB。

图 7 (b) 展示了在不同传输长度下中心纤芯高阶模 LP_{21} 和 LP_{31} 两个模式的转换效率的仿真结果。仿真表明, 在同一器件长度下随着波长的增加, LP_{21} 模式的转换效率会逐渐降低, 而 LP_{31} 模式的转换效率则会逐步升高, 这种变化主要是由不同波长的光进行模式转换时所需要的耦合长度不同造成的; 并且在同一工作波长处不同的器件长度下 LP_{21} 和 LP_{31} 两个模式的转换效率也不同, 这主要是由于模式转换存在周期性造成的。图 7 (b) 显示, 在该器件长度下在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处, LP_{21} 和 LP_{31} 模式的转换效率分别为 -0.31dB 和 -0.99dB ; 随着传输波长的增加, LP_{21} 模式和 LP_{31} 模式的转换效率越来越接近, 当传输波长增加到 $1.63\mu\text{m}$ 时, 二者趋于相等, 分别为 -0.69dB 和 -0.68dB 。图 7 (b) 还表明, LP_{31} 模式的转换效率变化受波长改变的影响更大, 而 LP_{21} 模式的转换效率变化则随器件长度改变的影响更大。

结合以上对模式转换效果的不同表征方法的说明, 在实际确定器件长度时需要综合考虑模式耦合的转换效率以及器件的插入损耗的表现。本文选取器件长度为 4.9mm , 由上面的仿真可知 4.9mm 长度大于左旁芯基模向中心纤芯 LP_{21} 模转换的耦合长度 4.4mm , 而小于右旁芯基模向中心纤芯 LP_{31} 模转换的耦合长度 6.2mm , 在该器件长度下左旁芯已完成了一次完整的模式全转换, 并且有一部分能量又重新从中心纤芯的 LP_{21} 模式转换回到了左旁芯中的基模; 而右旁芯则尚未完成从基模向中心纤芯 LP_{31} 模式的完全转换, 当传输 5.8mm 时即将完成能量的近似全转移, 只有当传输长度达到 6.2mm 时才能完成完全的能量转移, 但在 5.8mm 到 6.2mm 之间的能量转移效果相比而言并不是特别明显。因此, 本文 4.9mm 器件长度的确定主要考虑是在 $1.55\mu\text{m}$ 通讯波长处获得一个更好的插入损耗, 同时在该长度下也获得两个相对高的模式转换效率。本文也与已报道的一些模式转换复用器件的性能及参数进行了对比, 如表 1 所示, 其中对比参数综合考虑了器件的主要功能、工作波段、插入损耗、模式转换效率和器件长度等方面。对比表明, 本文所提出的模分复用器具有良好的性能并且具有更低的制作难度。

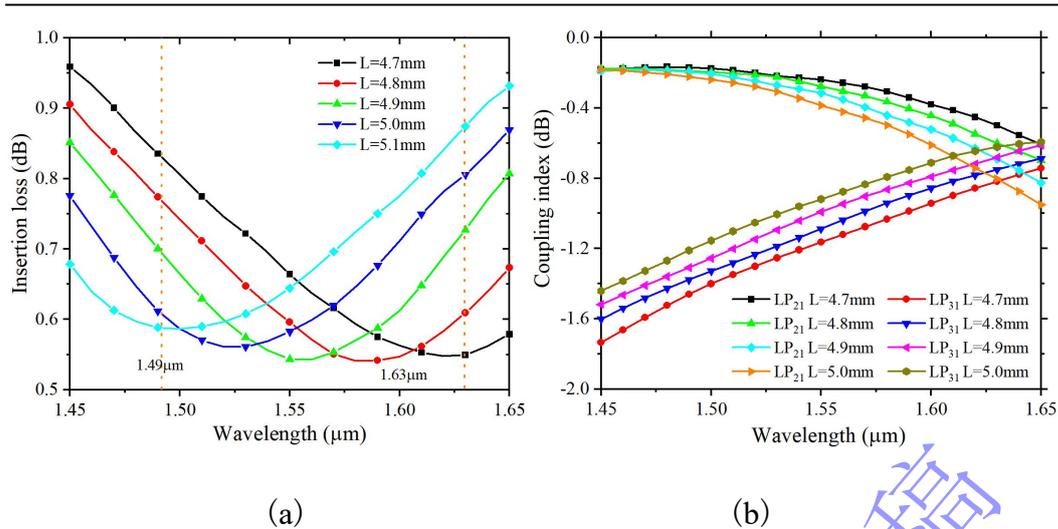


图 7 (a) 不同器件长度下的插入损耗随波长的变化关系; (b) 不同器件长度下的高阶模转换效率随波长的变化关系

Fig. 7. (a) Relationship between insertion loss and wavelength in different device lengths; (b) Wavelength dependence of higher-order mode conversion efficiency for different device lengths

表 1 本文所提出的模分复用器的特性与先前报导的器件间的对比。

Tab. 1 Comparison of the characteristics of the proposed mode division multiplexer with those of the previously reported devices.

器件类型	主要功能	工作波段	插入损耗	模式转换效率	器件长度	制作难易度	参考文献
椭圆芯五模群选择性光子灯笼复用器	10 种空间模式的转换复用	1530nm~1565nm	0.1dB~0.38dB	-0.79dB~-0.19dB	锥区 9cm	难	[2]
三维对称少模光纤(FMF)耦合器	6 种模式的转换复用	1530nm~1565nm	1.6dB	平均值-1.82dB	6.26cm	较难	[3]
少模环芯光纤模分多路复用器	3 种模式的转换复用	1530nm~1565nm		<-1.39dB	3.23cm	较难	[4]
非对称双芯光子晶体光纤可调谐模式转换器	可调谐, 单一模式的转换	1278 nm ~1317nm		-0.043dB (99%)	3.15mm	容易	[9]
三芯全固体光子晶体光纤模式转换器	3 种模式的转换复用	1550nm		-0.46dB	6.16mm	容易	[10]
非对称三芯光子晶体光纤宽带模分复用器	3 种模式的转换复用	1490nm~1630nm	<0.7dB	-0.19dB~-1.2dB	4.9mm	较容易	本文

6 模分复用器的输入与输出

本文所提出的模分复用器与现有模分复用方案相比，具有集成度高、受外界影响小等突出优点，但也存在体积小、内部微结构多等现实，因此采用常规技术手段很难实现高效的复用器输入与输出。为解决该问题，我们课题组进行了大量研究并提出了与多芯光纤空分复用器搭配使用的方案来解决模分复用器的输入问题，并取得了良好的效果。其实现方法如图 8 所示。

在图 8 中，左侧为根据模分复用器结构和尺寸进行定制的多芯空分复用器件，右侧为本文所提出的模分复用器件。其中左侧输出端上的 a、b、c 三芯和右侧输入端上的 o、p、q 三芯位置对应、尺寸匹配。使用时直接将空分复用器与模分复用器进行对芯熔接，然后从空分复用器左侧输入端伸出的三根单模光纤进行光信号输入即可实现对模分复用器的信号输入。而模分复用器的信号输出则可以通过将单芯少模光纤与复用器的输出端的中心少模纤芯进行对芯熔接来实现。

所述空分复用器的制作方法如下：（1）采用化学腐蚀方法将标准 125 μm 单模光纤的一端进行腐蚀直至其外径大小与模分复用器的各对应纤芯直径相等。（2）在高硼硅实心石英棒上按照待匹配的多芯光纤的纤芯排布进行打孔，然后将其送入拉丝塔进行拉丝，制备出多芯外套管。其中外套管内的各孔大小要略大于已腐蚀制备的各对应光纤的外径。（3）将单模光纤的腐蚀端插入外套管相应位置，然后对整体进行第二次拉锥直至各单模光纤的间距与模分复用器各芯间距一致。在拉锥中，由于外套管的低熔点，导致外套管只会将光纤束紧紧固定而不会影响各单模光纤间的结构排布比例和各自尺寸大小。（4）将拉锥后的外套管前端进行切割研磨，并与模分复用器进行对芯熔接。（5）将光源与各单模光纤的左侧输入端进行熔接和光信号输入，信号将由空分复用器各通道分别以基模的方式实现对模分复用器各纤芯的光信号输入。

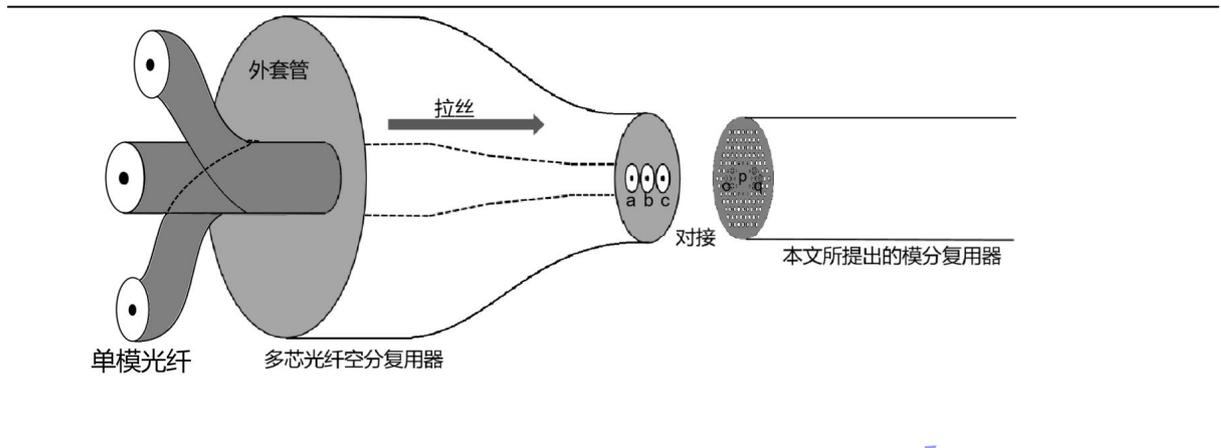


图 8 模分复用器的信号输入示意图

Fig. 8 Schematic diagram of input signal of mode division multiplexer

7 结论

以光耦合理论为研究基础, 利用有限元法对光子晶体光纤的剖面结构以及材料属性进行了仿真及优化, 实现了左旁芯 LP_{01} 与中心纤芯 LP_{21} , 右旁芯 LP_{01} 与中心纤芯 LP_{31} 的宽带相位匹配, 并结合超模理论计算得到了模式耦合长度。利用光束传播法对器件进行通光仿真, 结果显示与超模理论计算得到的结果吻合的很好, 也证明了利用超模理论来进行器件结构的辅助设计的正确性和便利性。最后对器件传输长度的选取及其性能进行了分析讨论, 确定了一个最优的传输长度的最小值为 4.9mm。该模分复用器在输入端对三个纤芯分别输入 LP_{01} 模式的光, 在输出端可同时实现左旁芯 LP_{01} 和右旁芯 LP_{01} 分别向中心纤芯 LP_{21} , LP_{31} 的最佳转换, 从而实现 LP_{01} 、 LP_{21} 和 LP_{31} 三种模式的光在中心纤芯中的复用。反之, 若将该器件的输出端用作输入端则可以实现中心纤芯中三种模式的光向三个纤芯的解复用。数值仿真结果表明在 $1.49\mu\text{m}$ - $1.63\mu\text{m}$ 的波段下, 该器件插入损耗最高为 0.72dB, 在中心波长 $1.55\mu\text{m}$ 处器件插入损耗最低为 0.543dB, 远低于模分复用器 1dB 插入损耗的评价标准。和现有的模分用方案相比, 该器件的集成性更高, 与多芯空分复用光纤搭配使用, 可以更好地提高模式转换效率和模式纯度, 降低模式耦合转换复杂度, 拓展通信容量。

参考文献

- [1]Ryf R, Bolle C, von Hoyningen-Huene. J 2011 *ECOC* Geneva, Switzerland, SEP 18-22, 2011.
- [2]Wang Y L, Zhang C, Fu S N, Zhang R, Shen L, Tang M, Liu D M 2019 *Opt Express*. **27** 27979
- [3]Shi J 2013 *M.S. Dissertation* (Changchun: Jilin University)(in Chinese)[石健 2013 硕士学位论文(长春: 吉林大学)]
- [4]Liu Q Q, Zheng H J, Li X, Bai C L, Hu W S, Yu R Y 2018 *Optoelectron. Lett.* **5** 336
- [5]Christos P. Tsekrekos, Dimitris Syvridis 2014 *J.Lightwave Technology*. **32** 2461
- [6]Liu Y, Dong Q H, Zheng H J, Li X, Bai C L, Hu W S, Li Y L, Wang X 2020 *Opt Commun*. **469**
- [7]Park K J, Song K Y, Kim Y K, Kim B Y 2014 *OFC* San Francisco, CA, MAR 09-13, 2014.
- [8]Chang S H, Chung H S, Fontaine N K, Ryf R, Park K J, Kim K, Lee J C, Lee J H, Kim B Y, Kim Y K 2014 *Opt Express*. **22** 14229.
- [9]Pang M, Xiao L M, Jin W, Cerqueira A 2012 *J.Lightwave Technology*. **30** 1422
- [10]Hou J P, Ning T, Gai S L, Li P, Hao J P, Zhao J L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4732 (in Chinese) [侯建平, 宁韬, 盖双龙, 李鹏, 皓建幸, 赵建林 2010 物理学报 **59** 4732]
- [11]Zhang M Y, Li S G, Yao Y Y, Zhang L, Fu B, Yin G B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3278 (in Chinese) [张美艳, 李曙光, 姚艳艳, 张磊, 付博, 尹国冰 2010 物理学报 **59** 3278]
- [12]Yu Y Y, Sun B 2018 *Crystals*. **8** 95
- [13]Cardona J A M, Cardona N D G, Valencia, E G, Trujillo P T, Vera E R 2019 *Photonics*. **7** 1
- [14]Zhang Y J, Wang Y, Cai S Y, Lan M Y, Yu S, Gu W Y 2015 *Photonics Res.* **3** 220
- [15]Yang J 2017 *M.S. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications)(in Chinese)[杨静 2017 硕士学位论文(南京: 南京邮电大学)]
- [16]Sun B, Chen M Y, Zhou J, Yu X Q, Zhang Y K, Yu R J 2010 *Acta Optica Sinica*. **6** 1581 (in Chinese) [孙兵, 陈明阳, 周骏, 余学权, 张永康, 于荣金 2010 光学学报 **6** 1581]
- [17]Rifat A A, Mahdiraji G A, Shee Y G, Shawon M J, Adikan F R M 2016 *Procedia Eng.* **140** 1
- [18]Kaliteevskiy N A, Korolev A E, Koreshkov K S, Nazarov V N, Sterlingov P M 2013 *Opt Spectrosc* **114** 913
- [19]Cai S Y, Yu S, Wang Y, Lan M Y, Gao L, Gu W Y 2016 *PTL*. **28** 3
- [20]F. Bagei 2013 *Opt.Pura.Apl.* **46** 265
- [21]Ji K, Chen H M 2018 *J Infrared Millim W.* **37** 50 (in Chinese)[季珂, 陈鹤鸣 2018 红外与毫米波学报 **37** 50]
- [22] T. Joseph, J. John 2019 *J Opt Soc Amer B*. **36** 1987
-

Design and research of a broadband mode division multiplexer based on three core photonic crystal fiber*

Wang Xiaokai¹⁾ Li Jianshe^{1)†} Li Shuguang¹⁾ Guo Ying¹⁾ Meng Xiaojian¹⁾ Wang Guorui²⁾ Wang Luyao¹⁾ Li

Zenghui¹⁾ Zhao Yuanyuan¹⁾ Ding Yuxin¹⁾

1) (Department of State Key Laboratory of metastable material preparation technology and science, School of science, Yanshan University, Hebei Key Laboratory of microstructure materials physics, Qinhuangdao 066004)

2) (School of information science and engineering, Northeastern University, State Key Laboratory of integrated automation of process industry, Shenyang 110004)

Abstract

A broadband mode division multiplexer based on asymmetric three core photonic crystal fiber is proposed in this paper. The device is mainly composed of a central core, which can provide the transmission of fundamental mode and higher-order mode, and two side cores providing fundamental mode transmission. According to the theory of optical coupling, the LP_{01} mode light is input to the three fiber cores at the initial port respectively, during the transmission process, the LP_{01} mode in the left side core will be coupled and converted to the LP_{21} mode light in the central core gradually. Similarly, the LP_{01} mode of the right side core is transitioned to the LP_{31} mode of the center core. By optimizing the structural design and selecting the length of optical fiber, the best conversion from side core to central core can be completed at the output end simultaneously, so as to realize the multiplexing of LP_{01} , LP_{21} and LP_{31} modes in the central core. In the opposite direction, if the output end of the

device is used as the initial port, the demultiplexing of three modes of light from the central core to the three cores can be realized. In this paper, the finite element method and beam propagation method are used to optimize the simulation, and the optical coupling theory and supermode theory are combined to analyze and calculate. The results show that at wavelength band from $1.49\mu\text{m}$ to $1.63\mu\text{m}$, the maximum insertion loss of the device is 0.72dB , and the lowest insertion loss is 0.543dB at $1.55\mu\text{m}$, which is far lower than the general evaluation standard of 1dB insertion loss. Low insertion loss also makes it possible to design cascaded multi-core photonic-crystal-fiber mode division multiplexer. Compared with the existing mode division multiplexing scheme, the device is more integrated and less affected by the external environment. When it is used with multi-core space division multiplexing fiber, it can better improve the mode conversion efficiency and mode purity, reduce the coupling complexity and expand the communication capacity.

Keywords: Mode division multiplexer, photonic crystal fiber, insertion loss, supermode

PACS: 42.79.Sz, 42.79.Gn, 42.81.Qb, 42.82.Et

* Project supported by National Key Research and Development Project (Grant No. 2019YFB2204001), the National Natural Science Foundation of China (12074331), the Program of the Natural Science Foundation of Hebei Province (Grant No. F2020203050, F2017203193).

† Corresponding author. E-mail: jjianshelee@ysu.edu.cn
