

基于少模光纤的全光纤熔融模式选择耦合器的设计及实验研究

肖亚玲 刘艳格 王志 刘晓颀 罗明明

Design and experimental study of mode selective all-fiber fused mode coupler based on few mode fiber

Xiao Ya-Ling Liu Yan-Ge Wang Zhi Liu Xiao-Qi Luo Ming-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 204207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.204207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于飞秒激光抽运的石墨烯包裹微光纤波导结构的级联四波混频研究

Four-wave-mixing generated by femto-second laser pumping based on graphene coated microfiber structure

物理学报.2015, 64(18): 184214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184214>

一种高双折射高非线性多零色散波长光子晶体光纤

Photonic crystal fibers with high nonlinearity large birefringence and multiple zero dispersion-wavelength

物理学报.2014, 63(13): 134210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134210>

统一非对称光波导横向耦合模理论分析

Analysis of unified unsymmetric lateral coupled-mode theory of optical waveguide

物理学报.2013, 62(18): 184213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184213>

硅基光栅耦合器的研究进展

The progress of silicon-based grating couplers

物理学报.2013, 62(18): 184214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184214>

一种覆盖全通信波段的新宽带偏振无关双芯光纤定向耦合器的研究

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

物理学报.2012, 61(15): 154207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.154207>

基于少模光纤的全光纤熔融模式选择耦合器的设计及实验研究*

肖亚玲 刘艳格† 王志 刘晓颀 罗明明

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

(2015年4月21日收到; 2015年5月26日收到修改稿)

提出了三种基于少模光纤的全光纤熔融模式选择耦合器. 根据模式匹配原理采用单模光纤与少模光纤熔融连接方式, 运用耦合模理论及光束传播法模拟分析了模式选择耦合器的结构参数对模式选择及耦合特性的影响, 实现了单模光纤中基模到少模光纤中不同阶模式的转换, 以满足不同的应用需求. 实验上以 2×2 熔融光纤耦合器为例, 采用对称和非对称熔融拉锥方式, 分别实现了从基模到 LP_{11} , LP_{21} 模式的转换. 实验结果表明所得到的 LP_{11} , LP_{21} 模式在 1530—1560 nm 的波长带宽范围内均有较高的模式纯净度, 且模式耦合效率高于 80%, 与理论模拟结果基本一致.

关键词: 光纤光学, 少模光纤, 模式选择耦合器, 熔融拉锥

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

DOI: 10.7498/aps.64.204207

1 引言

近年来, 随着波分复用、偏振复用以及相干接收和多阶调制等技术的相继采用, 光波在单模光纤中的所有自由度: 频率、偏振、幅度和相位都已经被利用, 传输系统容量正在接近单模光纤传输的香农极限^[1-4]. 为了进一步提高光纤传输容量, 解决日益紧张的带宽资源瓶颈问题, 基于少模光纤的模分复用技术成为有效的方案之一, 并已成为近几年光纤通信领域的研究热点^[5-7].

当使用少模光纤中的不同模式作为信道进行复用传输时, 需要借助模式选择耦合器来实现基模到高阶模式的转换, 且要求转换后模式纯度高, 模间串扰低^[8]. 模式选择耦合器是一种实现不同模式间转换的器件, 比较常见的是基于光纤光栅的模式选择耦合器^[9,10], 这种器件虽然结构相对简单, 但是对波长的依赖性强, 工作带宽窄, 且转换后基模与高阶模式在同一根光纤中传输, 导致模间串

扰. 文献^[11, 12]提出了基于光子晶体光纤的模式选择耦合器, 该种器件可以实现高消光比的模式转换, 但制作工艺要求较高. Tsekrekos 和 Syvridis^[13]采用少模光纤与少模光纤结合的级联 2×2 模式选择耦合器, 实现了模分复用传输, 但其只限于理论模拟, 且器件的制作成本较高, 对工作带宽也未做进一步分析. 2014年, Ismaeel 等^[14]提出了一种基于少模光纤与单模光纤结合的模式选择耦合器, 他们采用弱熔融拉锥方式, 以维持耦合区端面结构不被改变, 将基模分别转换为 LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式, 且模式转换效率较高, 但其研究比较初步, 并没有涉及模式转换过程中各光纤中模式能量和模场的具体变化过程及熔融度对耦合效率的影响等方面的研究.

本文设计并详细研究了三种基于少模光纤的全光纤熔融模式选择耦合器, 利用单模光纤与少模光纤组成的 2×2 模式选择耦合器, 将单模光纤中的基模 LP_{01} 分别转换为少模光纤中的 LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式, 之后改变结构参数实现了单模光纤中

* 国家自然科学基金(批准号: 61322510, 11174154)和天津市自然科学基金重点项目(批准号: 12JCZDJC20600)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ygliu@nankai.edu.cn

基模 LP₀₁ 到少模光纤中 LP₀₁, LP₁₁ 模式的复用转换. 利用 3×3 模式选择耦合器, 实现了单模光纤中基模 LP₀₁ 到少模光纤中的 LP₁₁, LP₂₁ 模式的转换, 且不同的模式从不同的端口输出, 减少了模式间的串扰. 在实验上利用对称和非对称熔融拉锥法拉制出 2×2 模式选择耦合器, 实现了基模到高阶模式的转换, 且模式纯度较高.

2 全光纤熔融模式耦合器的工作原理

基于少模光纤的全光纤熔融型模式耦合器, 因其对模式具有选择耦合和分离的作用, 故将其称为模式选择耦合器. 为实现基模到高阶模式的转换, 且使器件能够在较宽的波长范围内均有很好

的转换性能, 这里采用单模光纤 (single-mode fiber, SMF) 与少模光纤 (few-mode fiber, FMF) 结合的耦合器. 该耦合器利用相位匹配的原理, 将少模光纤和标准单模光纤进行熔融连接, 经过一段作用距离以后, 不同的模式满足不同的相位匹配条件, 表现出不同的输出特性. 以 2×2 耦合器为例, 如图 1 (a) 为全光纤熔融模式选择耦合器的结构图: 该耦合器分为少模光纤臂、单模光纤臂及熔融部分. 当单模光纤臂注入 LP₀₁ 模时, 在少模光纤臂的输出端输出 LP₁₁ 等高阶模, 起到的是模式转换的功能. 其中: II 和 III 是熔锥区; I 是耦合区; L 是耦合区轴向长度, P_0 是输入光功率, P_1, P_2 均是输出光功率.

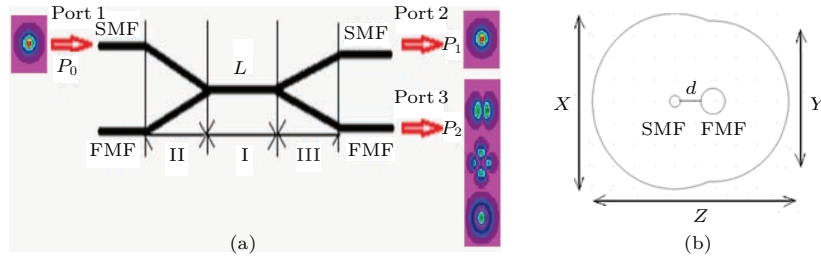


图 1 (网刊彩色) (a) 全光纤熔融模式选择耦合器的结构示意图; (b) 耦合区端面结构图, X 为单模光纤的直径, Y 为少模光纤的直径, Z 为耦合区端面结构的宽度, d 是单模光纤与少模光纤的纤芯间距

Fig. 1. (color online) (a) The structure of mode selective all-fiber fused couplers; (b) the cross section of the coupling area; where X is the diameter of the single-mode fiber, Y is the diameter of the few-mode fiber and Z the width of the structure, d is the core distance between the single-mode fiber and few-mode fiber.

当入射光从输入端以功率 P_0 进入熔锥区 II 后, 因单模光纤的传导模为两个正交的基模信号, 光纤归一化频率随着纤芯的变细而逐渐变小, 导致越来越多的光渗入包层; 进入耦合区 I 后, 两光纤合并在一起, 光在复合波导中传输, 并使光功率发生再分配; 当光进入熔锥区 III 后, 归一化频率随纤芯的变粗而逐渐增大, 使光以特定比例从两个输出端输出.

假设光纤是无吸收的, 由耦合模方程:

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = i(\beta_1 + C_{11})A_1 + iC_{12}A_2, \quad (1)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = i(\beta_2 + C_{22})A_2 + iC_{21}A_1, \quad (2)$$

式中, A_1 和 A_2 分别为单模光纤中的基模和少模光纤中被激起的某一模式的模场振幅; β_1 和 β_2 分别为单模光纤中基模和少模光纤中被激起的某一模式的传输常数; C_{11} 和 C_{22} 为自耦合系数; C_{12} 和 C_{21} 为互耦合系数. 自耦合系数相对互耦合系数很

小, 可以忽略, 且近似有 $C_{12} = C_{21} = C$, 其中 C 取决于耦合区域尺寸与 L 有关的函数. 经上式推导求得耦合器两输出端口的光功率为

$$P_1(z) = |A_1(z)|^2 = 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \quad (3)$$

$$P_2(z) = F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \quad (4)$$

其中, $F = \left[1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4C^2}\right]^{-1/2}$, F^2 为光纤之间耦合的最大功率.

由 (3) 和 (4) 式可知, 光在光纤耦合器内传输时能量会在两光纤间发生周期性的转移, 且当能量第一次从一根光纤完全转移到另一根光纤时所传输的最短距离被称为耦合长度. 当传输长度等于零时, 从单模光纤输入端输入基模; 当传输长度等于耦合长度一半时, 单模光纤中的基模逐渐从单模光纤转移到少模光纤中的某一相位匹配的模式; 当传输长度等于耦合长度时, 单模光纤中的基模完全转换为少模光纤中某一相位匹配的模式, 此时能量

完全从单模光纤转移到少模光纤, 达到模式转换的目的.

由于该种器件是完全基于光纤的熔融型器件, 虽然结构简单, 但工艺复杂. 尤其是熔融时, 两光纤间的熔融程度和耦合区的拉伸长度均需要精确控制. 光纤的熔融程度又称为熔融度 (degree of fusion, DoF)^[15], 表达式为

$$\text{DoF} = \frac{2Z}{X + Y}, \quad (5)$$

其中, X 为单模光纤的直径, Y 为少模光纤的直径, Z 为耦合区端面结构的宽度, 耦合区端面结构图如图 1(b) 所示. 当熔融度为 1, 代表两根光纤间完全熔融; 熔融度为 2, 代表光纤间没有熔融.

3 不同功能模式选择耦合器的参量设计及耦合特性

3.1 2×2 模式选择耦合器

基于少模光纤的模式选择耦合器设计的基本准则就是折射率匹配. 耦合器由单模光纤与少模光纤构成, 结构如图 1(a) 所示, 所采用的单模光纤为标准的单模光纤 SMF-28, 少模光纤 (纤芯直径/包层直径 = 20/125 μm , $\Delta n = 0.005$) 在 1550 nm 波长下支持 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 四个模式.

在通信或传感系统应用中, 既需要激发少模光纤中单一高阶模式的耦合器, 也需要同时激发少模光纤中两个或多个模式的耦合器. 据此, 我们设计了两类不同应用情况下的 2×2 模式耦合器.

3.1.1 单一高阶模式激发的模式选择耦合器

为实现在少模光纤中进行单一高阶模式激发, 则在 Port 3 端输出一个高阶模式. 由于在耦合区随着拉伸长度的增加光纤纤芯和包层的直径均发生变化, 这里假设在变化过程中纤芯和包层的直径等比例缩小, 利用 COMSOL 软件, 采用纤芯、包层、完全匹配层所组成的三层系统, 分别计算了在 1550 nm 波长下单模光纤中基模与少模光纤中各模式的有效折射率随纤芯半径的变化关系, 如图 2 所示. 为实现单模光纤中基模到少模光纤中高阶模式的转换, 需满足相位匹配条件, 此时可通过分别控制单模光纤与少模光纤的芯径来实现. 如在数值计算中取单模光纤中基模的有效折射率为 1.4447, 如图 2 中横实线所示, 则当模式间达到相位匹配时单模光纤和少模光纤所对应的芯径参数如表 1 所列.

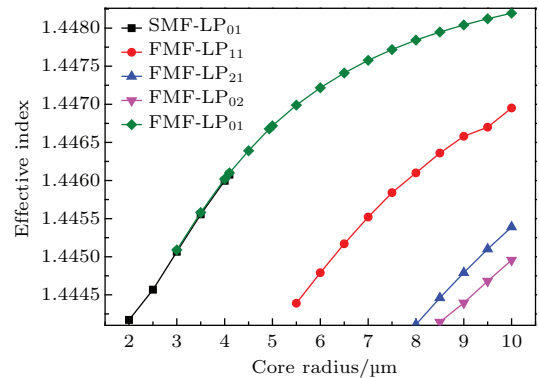


图 2 (网刊彩色) 1550 nm 波长下单模光纤中的基模与少模光纤中各模式的有效折射率随纤芯半径的变化

Fig. 2. (color online) The mode effective index curves for the LP_{01} in the SMF and the LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} mode in FMF along core radius at the wavelength of 1550 nm

表 1 实现基模向不同模式转换的匹配半径参数

Table 1. The matching radius parameters for mode conversion from LP_{01} mode to other ones.

$N_{\text{eff}} = 1.4447$	Mode	FMF- LP_{01}	FMF- LP_{11}	FMF- LP_{21}	FMF- LP_{02}
	Radius/ μm		2.65	5.92	8.92

当达到模式匹配时, 在耦合区可以将单模光纤中的基模转换为少模光纤中的模式, 为研究模式转换过程中耦合器结构参数对模式转换特性即耦合特性的影响, 这里利用 Rsoft 软件中的光束传播法^[16]进行模拟讨论. 设耦合区均匀分布, 用三维模型在 1550 nm 波长下计算了耦合长度和耦合效率随两根光纤纤芯间距的变化关系, 如图 3 所示.

由图 3(a) 可知, 随着纤芯间距的增大, 耦合长度也随之增加, 且在相同的纤芯间距下, LP_{21} 模式的耦合长度最长, LP_{02} 次之, LP_{11} 最短. 由于 LP_{21} 与 LP_{02} 模式有效折射率差较小, 当纤芯间距小于 8 μm 时, 两模式的耦合长度相差微小, 当纤芯间距大于 8 μm 时, LP_{21} 与 LP_{02} 模式耦合长度差值逐渐增大. 所以若将基模分别转化为 LP_{21} 和 LP_{02} 模

式, 为避免模式串扰, 光纤拉制参数需要精确控制, 纤芯间距大于 $8\ \mu\text{m}$ 更好.

纤芯间距不仅对耦合长度产生影响, 同时也影响模式间的耦合效率. 如图 3 (b) 所示, 当纤芯间距小于 $7\ \mu\text{m}$ 时, 随着纤芯间距的增大, LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式的耦合效率均呈单调递增趋势; 当纤芯间距大于 $7\ \mu\text{m}$ 时, 各模式的耦合效率基本平稳, 大约在 90%. 由耦合模理论知, 耦合系数和相位匹配常数决定了功率转移的最大值. 但是, 当满足相位匹配条件时, 若增大耦合系数^[17], 就需要适当减小纤芯间距以减弱相位失配对耦合特性的影响. 因此, 选择合适的纤芯间距至关重要.

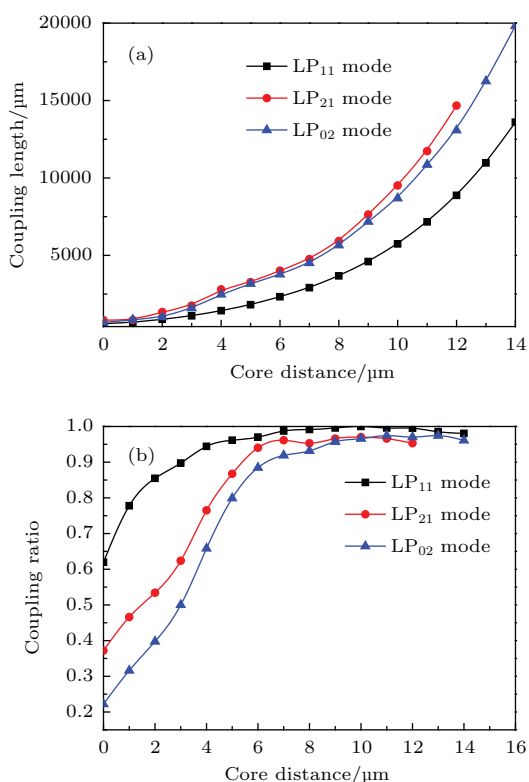


图 3 (网刊彩色) (a) LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式的耦合长度随纤芯间距的变化; (b) LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式的耦合效率随纤芯间距的变化

Fig. 3. (color online) (a) Coupling length along the core distance for LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} mode; (b) coupling ratio along the core distance for LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} mode.

通过以上分析, 为了实现基模到 LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式的转换, 且使耦合效率和模式纯度较高, 我们分别取纤芯间距 $d = 10, 10, 11\ \mu\text{m}$. 此时 LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式耦合器的耦合效率分别为 100%, 97%, 97%. 图 4 (A) 是模式选择耦合器的能量流动二维示意图, 由两根光纤组成, 上层是单模

光纤, 下层是少模光纤, 两光纤间距为 d , 基模从单模光纤注入, 模式能量在两光纤中产生变化, 经过一段距离的传输, 基模从单模光纤耦合到少模光纤中, 在少模光纤输出端分别输出 LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模式. 传输过程中模式的能量变化如图 4 (B) 所示, 可以发现, 随着传输距离的增加, 能量从基模转移到高阶模式, 当能量完全从基模转化为高阶模时, 此时的传输距离为耦合长度, 分别为 5739, 9510, 10860 μm . 当传输距离大于耦合长度时, 能量又从高阶模式转移回基模.

传输过程中伴随着能量的转移, 模场也随之变化, 图 4 (C) 所示为模拟了传输过程中耦合区模式的演变过程. 其中, (a) 中传输距离为零, 此时从单模光纤中输入基模; (b) 中传输距离等于耦合长度的一半, 可以看到单模光纤中的基模逐渐耦合到少模光纤中的高阶模; (c) 中传输距离等于耦合长度, 此时基模基本上完全转换为高阶模式, 且耦合效率都非常高, 模式纯度较好.

在传输过程中模式耦合效率与耦合器结构参数中的纤芯间距密切相关, 而纤芯间距由耦合器拉制过程中光纤的熔融度决定, 即熔融度决定了耦合效率. 图 5 (a) 给出了耦合效率与熔融度的关系, 可以发现, 当熔融度小于 1.07 时, 耦合效率随熔融度的增加而增大, 在 1.07 处最大耦合效率接近 95%; 当熔融度大于 1.07 时, 熔融度的改变基本上不会对耦合效率产生影响. 产生此种现象的原因可能是由于纤芯的作用, 当熔融度较小时, 满足相位匹配的两模式间产生一定的微扰, 导致耦合效率有所下降, 此时耦合模方程不再适用, 关于纤芯对耦合的影响将在以后的工作中做进一步的研究.

尽管增加熔融度可以增大两模式间的耦合效率, 但将会改变耦合器的端面结构, 致使很难找到两光纤间的模式匹配参数. 不过该理论模拟结果仍可为后续耦合器的制作提供重要参考.

以上讨论了 1550 nm 波长下耦合器的耦合效率及模场的变化, 图 5 (b) 给出了在不同波长下耦合器的耦合情况, 可以发现, 随波长增加耦合效率呈抛物线式变化, 先增大后减小, 在 1550 nm 附近达到最大. 定义耦合效率大于 80% 的波长范围为耦合器的工作波长带宽, 则基模分别转换为高阶模 LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 时, 耦合器的工作波长带宽分别为 98, 40 和 38.5 nm.

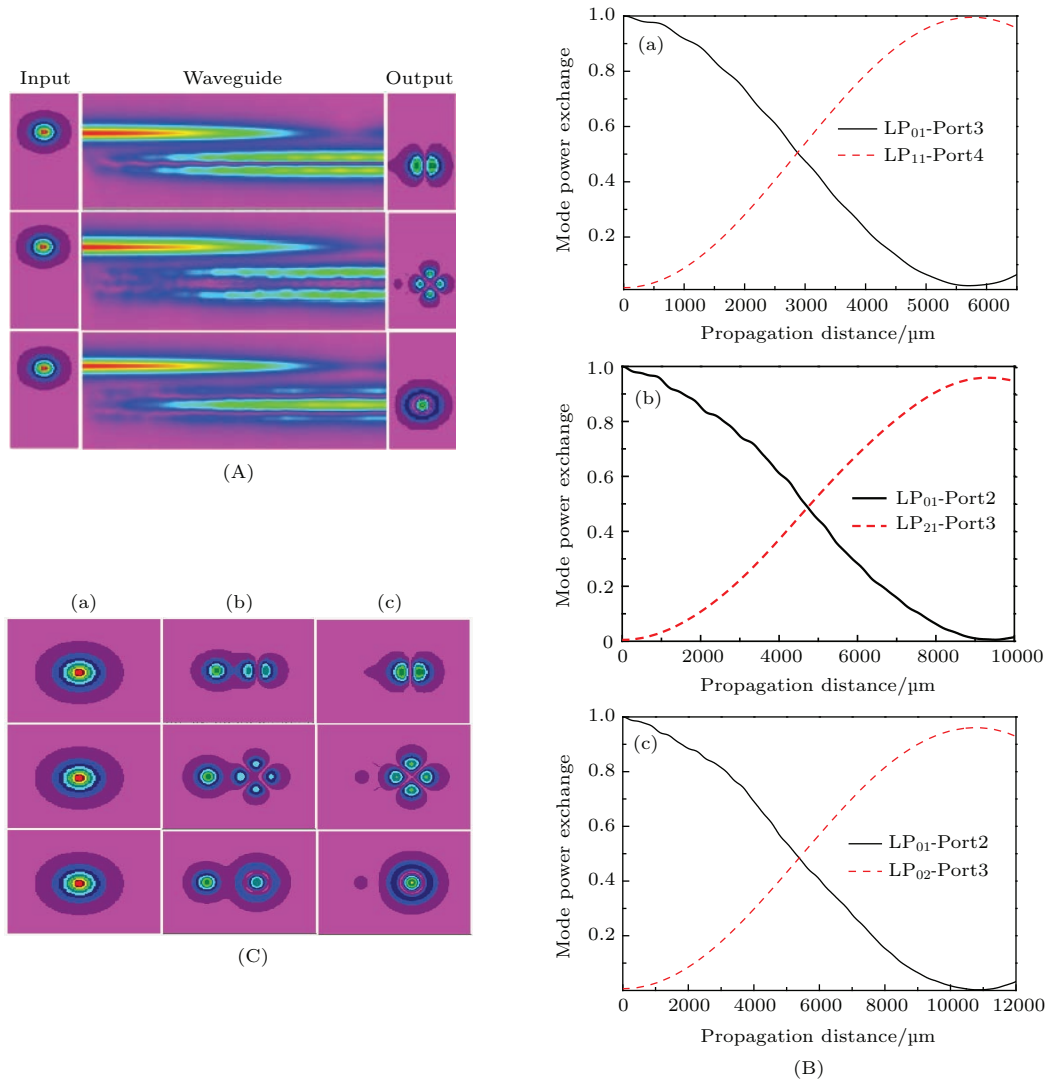


图4 (网刊彩色) 模拟仿真 (A) 模式选择耦合器的能量流动二维示意图; (B) 1550 nm 波长下纤芯中模式能量随传输距离的关系: (a) LP₀₁ 与 LP₁₁, (b) LP₀₁ 与 LP₂₁, (c) LP₀₁ 与 LP₀₂; (C) 从 SMF 到 FMF 中模式的演变过程: (a) 当传输距离为零时, 从单模光纤输入基模, (b) 当传输距离等于耦合长度一半时, 模式的演变, (c) 当传输距离等于耦合长度时, 在少模光纤输出端输出的模式

Fig. 4. (color online) Simulation: (A) Two-dimensional sketch of energy flow for mode selective couplers; (B) evolution of the coupling ratio for pure LP₀₁ and (a) LP₁₁, (b) LP₂₁, (c) LP₀₂ mode at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ as a function of the propagation distance; (C) the evolution of the mode from SMF to FMF, (a) input LP₀₁ mode to the SMF (that is to say when propagation length is equal to zero), (b) evolution of the modes in SMF and FMF, respectively, here the propagation length is equal to half of the coupling length, (c) output mode of the FMF (here the propagation length equals coupling length).

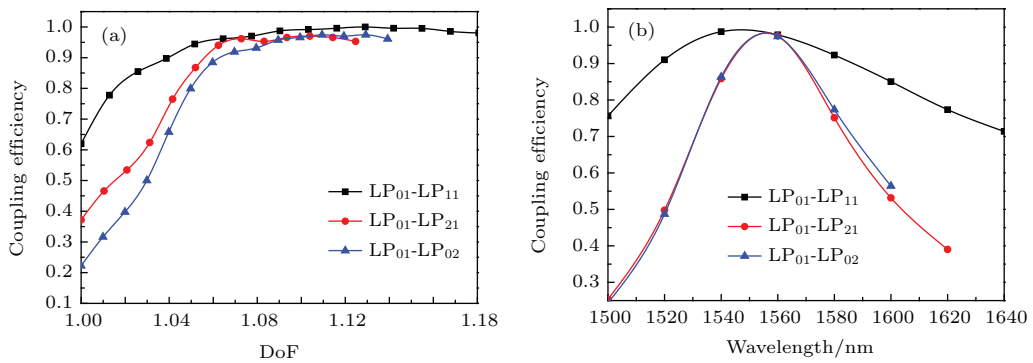


图5 (网刊彩色) (a) 耦合效率随熔融度的变化关系; (b) 在 1.50—1.64 μm 波长范围内的耦合效率

Fig. 5. (color online) (a) The coupling efficiency along the DoF; (b) the coupling efficiency for different wavelength from 1.50 to 1.64 μm .

3.1.2 同时激发少模光纤中两个模式的模式选择耦合器

在模分复用及传感系统中,有时需要利用耦合器同时激发两个或多个高阶模式,即在耦合器少模光纤输出端至少存在两种不同的混合模式.这里以Port 3端输出LP₀₁和LP₁₁模式为例进行模拟讨论.

与3.1.1节中所设计的耦合器不同,光从单模光纤Port 1端输入,经耦合区基模转换为少模光纤中的LP₀₁和LP₁₁模式,从Port 3端输出,在Port 2端输出LP₀₁模式.首先我们计算了模式间耦合效率及耦合长度与两光纤纤芯间距的关系,如图6所示.由图6(a)知随着纤芯间距的增大,少模光纤中LP₁₁模式的耦合效率呈增加趋势,而LP₀₁模式的耦合效率则逐渐减少,LP₁₁模式能量始终大于LP₀₁模式.当纤芯间距为零,即两纤芯重合时,两模式能量相差最小.图6(b)中随着纤芯间距的增大,耦合长度也随之增加.可根据应用所需LP₀₁与LP₁₁模式的能量比选择合适的纤芯间距参数.

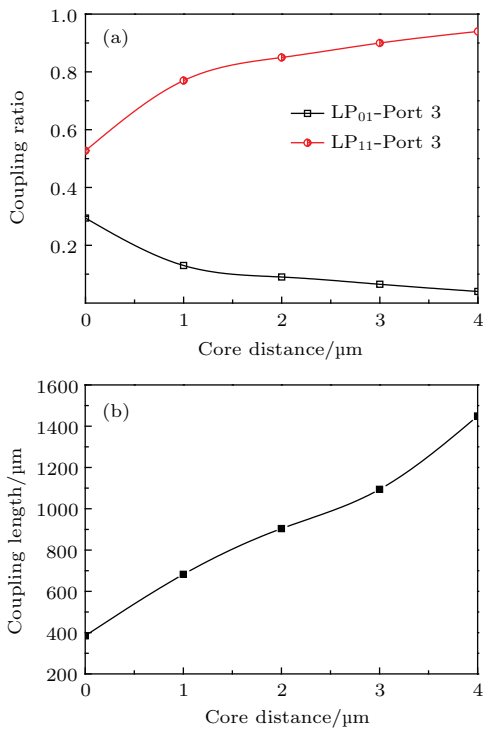


图6 (网刊彩色) 模式间(a)耦合效率及(b)耦合长度与两光纤纤芯间距的关系

Fig. 6. (color online) (a) Coupling ratio and (b) coupling length along the core distance.

为使LP₀₁与LP₁₁模式间能量差值最小,我们选取纤芯间距 $d = 0 \mu\text{m}$,此时Port 3中LP₀₁与LP₁₁功率比0.554.此时,我们计算了不同波长下

总的功率转移及Port 3中LP₀₁与LP₁₁的功率比,如图7所示.随波长的增加,能量从单模光纤到少模光纤的转移逐渐减少,而两模式的功率比呈逐渐上升趋势,这与纤芯间距逐渐增大情况下的趋势一致.说明随纤芯间距的增加,模式耦合逐渐减弱.在波长小于1550 nm时,总的转移功率仍大于80%,且少模光纤中LP₁₁模式的能量始终大于LP₀₁模式的能量.

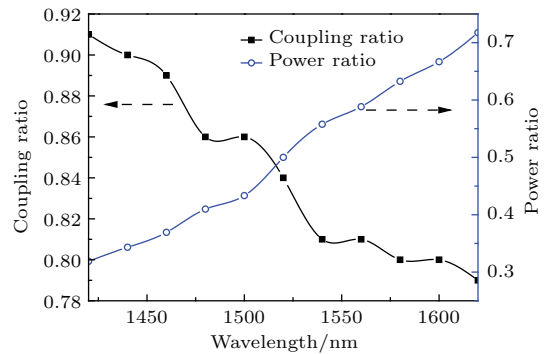


图7 不同波长下总的功率转移及Port 3端LP₀₁与LP₁₁的功率比

Fig. 7. The total power transfer under different wavelength and power ratio between LP₀₁ and LP₁₁ mode in Port 3.

3.2 3 × 3 模式选择耦合器的理论设计

与2 × 2模式选择耦合器不同,为同时得到多个较高纯度的高阶模式,根据表1中的光纤模式间匹配参数及3.1节中纤芯最佳距离,设计如图8所示的3 × 3模式转换耦合器.光从单模光纤Port 1端输入,基模经耦合区分别耦合到两边的少模光纤中,且在不同的输出端输出不同的高阶模式,在Port 3端输出LP₁₁模式,在Port 4端输出LP₂₁模式,在Port 2端输出LP₀₁模式,不同的模式从不同的端口输出,保证最后输出的模式中不包含其他模式成分,有效避免模式串扰,实现高效的模式转换.取单模光纤与少模光纤纤芯间距均为10 μm,由图9(a)可得在1550 nm波长下耦合长度为5218 nm,由于

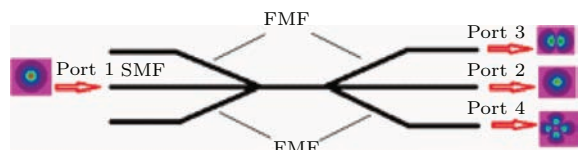


图8 (网刊彩色) 3 × 3 模式选择耦合器的结构图

Fig. 8. (color online) The structure of 3 × 3 mode selective coupler.

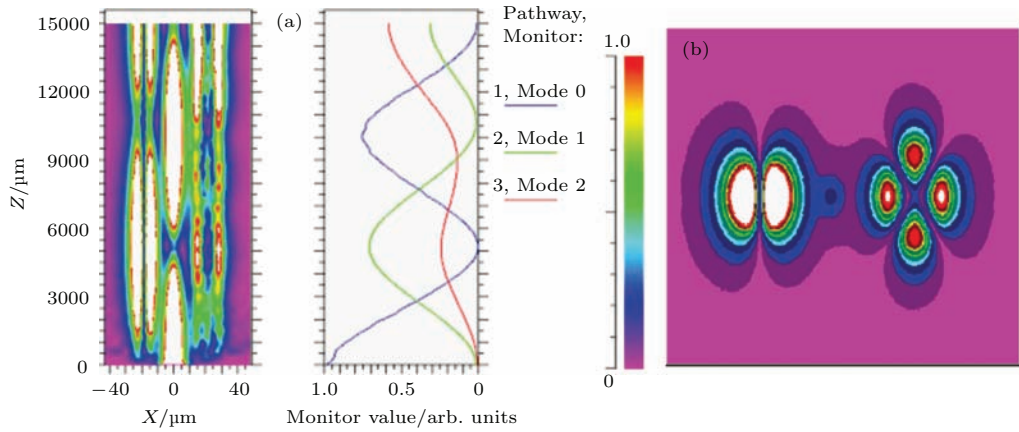


图9 (网刊彩色) 1550 nm波长下 (a) 各模式功率随传输距离的变化, (b) 输出端的模场情况

Fig. 9. (color online) (a) The power of every mode along the propagation distance at 1550 nm; (b) the mode field at the output side at 1550 nm.

基模与 LP_{11} 模式间有效折射率差值最小, 基模更容易耦合到 LP_{11} 模式, LP_{11} 与 LP_{21} 功率比大约为 3. 此时输出端模场情况如图 9 (b) 所示, 可以看到单模光纤中的基模几乎全部转换为少模光纤中的 LP_{11} , LP_{21} 模式, 且模式纯净度较高.

图 10 给出了在不同波长下耦合器的耦合比及输出端高阶模 LP_{11} 与 LP_{21} 功率的比值, 随着波长的增加, 耦合比先增加后减少, 在 1570 nm 波长附近达到最大; 功率比先减少后增加, 在 1580 nm 波长附近达到最小.

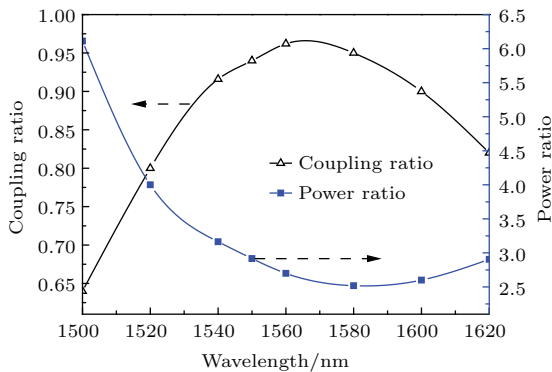


图 10 不同波长下耦合器的耦合比及输出端高阶模 LP_{11} 与 LP_{21} 功率的比值

Fig. 10. The coupling ratio in different wavelength and the power ratio between LP_{11} and LP_{21} at output side.

4 2×2 模式选择耦合器的制备及其特性

采用熔融拉锥方式拉制 2×2 模式耦合器. 拉制前设定拉锥程序的各项参数, 并对单模光纤和少模光纤分别进行预处理, 去除涂敷层并使用酒精清

洁; 此外保持光纤输出和输入端面切削平整, 以降低功率损耗, 增大输出功率.

根据 3.1.1 节中模拟参数, 将单模光纤中的基模转换为少模光纤中的 LP_{11} 模式时, 单模光纤无须预拉, 此时使用对称熔融拉锥法, 将预处理过的单模光纤与少模光纤打结扭绞后置于氢氧焰下加热, 并用防尘罩罩好耦合段, 防止灰尘杂物影响耦合区的耦合. 拉伸期间严格控制火焰温度, 2 次改变拉伸速度, 并用 CCD 对输出模场进行实时观察. 当耦合区拉伸长度为 14.8 mm 时, 两光纤间功率转移第一次达到最大, 此时停止拉伸可在少模光纤输出端得到 LP_{11} 模式.

同样的拉制方法用于将单模光纤中的基模转换为少模光纤中的 LP_{21} 模式, 由 3.1.1 节中模拟数值知此时需要将单模光纤进行预拉伸到包层半径为 $45 \mu\text{m}$, 之后将单模光纤与未拉伸的少模光纤一起置于氢氧焰下, 拉制出非对称熔融的光纤模式选择耦合器. 当耦合区长度拉伸至 22 mm 时, 功率转移第一次达到最大值, 此时停止拉伸在少模光纤输出端得到 LP_{21} 模式.

图 11 为少模光纤输出端分别输出 LP_{11} , LP_{21} 模式时两模式选择耦合器的输出光谱, 所拉制的两个模式耦合器在 1550 nm 波长处的耦合效率分别为 80%, 82%, 两耦合器总的插入损耗均小于 0.8 dB, 且在少模光纤输出端存在一定的干涉现象. 这可能是由于在少模光纤输出端存在少量 LP_{01} 模式, 引起 LP_{01} 模式的主要原因是拉制过程中锥区结构的变化, 特别是耦合区的变化, 将导致耦合器模式参数的失配.

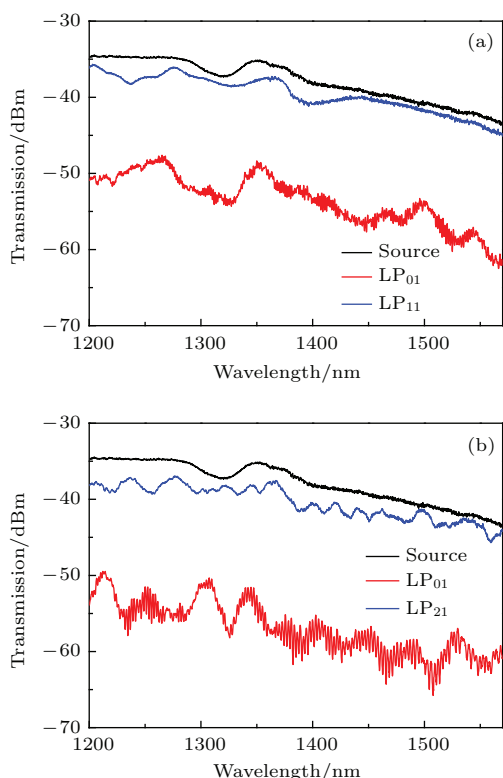


图 11 (网刊彩色) 耦合器两臂的输出光谱 (a) LP_{11} 模式选择耦合器; (b) LP_{21} 模式选择耦合器

Fig. 11 (color online) Output spectra of the two arms of the coupler for the (a) LP_{11} mode selective couplers, (b) LP_{21} mode selective couplers.

图 12 是在光学显微镜下观察的耦合器拉制过程中耦合区最中间部分两光纤的端面结构图, 与模拟所用结构模型形状一致, 证明了模拟的可借鉴性. 在拉制过程中, 使用 CCD 观察少模光纤输出端模场的变化, 并改变可调谐激光器的波长, 记录

从 1530—1570 nm 波长下模场的情况, 如图 13 所示. 由图 13 可以看出 LP_{11} 模式在 1530—1560 nm 的波长带宽范围内有很高的模式纯净度, 模式耦合效率高于 80%; LP_{21} 模式在 1540—1560 nm 附近的波长范围内有较高的模式纯净度, 耦合效率大于 80%. 这均与 3.1 节中所模拟的模式选择耦合器的工作带宽相符. 所拉制的模式选择耦合器具有模式转换效率高、模式串扰小、损耗低等优点, 可用于模分复用传输系统中.

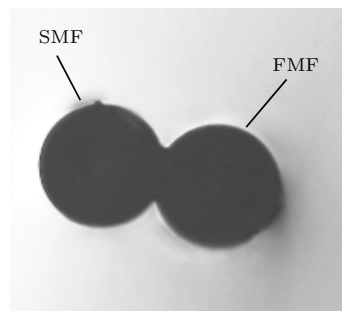


图 12 熔融光纤耦合区在光学显微镜下的端面结构图
Fig. 12. The optical microscope image of the cross section of fused coupling area.

在理想情况下, 尽管假设对于相匹配的两模式传输常数一样, 但在实际的拉制过程中, 由于火焰摆动导致光纤受热不均等其他因素, 很难保证耦合区光纤端面结构不被改变, 而端面结构的改变会导致耦合功率的迅速减少, 因此严格控制拉制过程中火焰温度和拉伸速度以保证结构与预想一致至关重要.

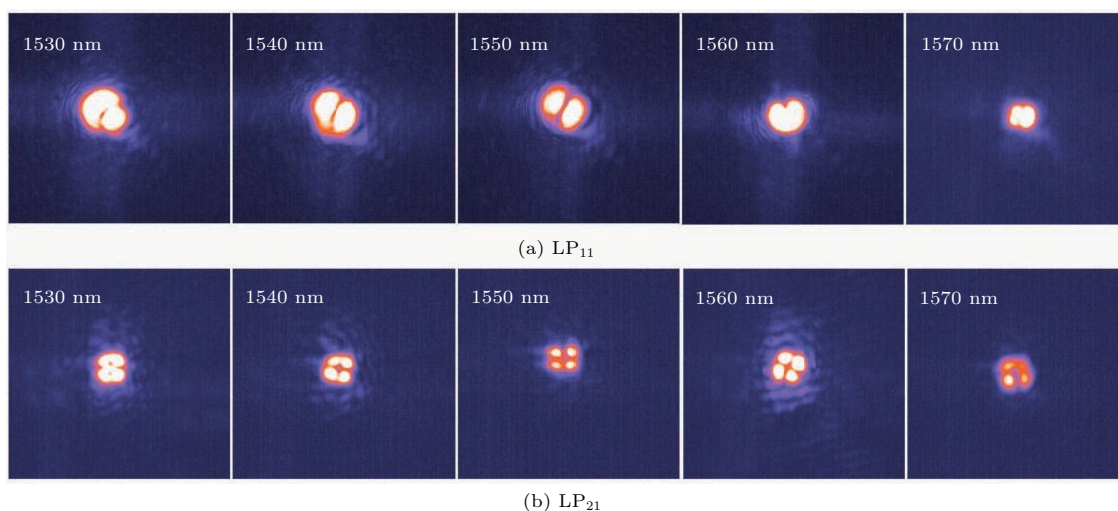


图 13 (网刊彩色) 用 CCD 观察的不同波长下在少模光纤中激发的 LP_{11} , LP_{21} 模式图

Fig. 13. (color online) CCD images of the LP_{11} , LP_{21} modes excited in the FMF at different launching wavelengths.

5 结 论

本文提出了三类基于少模光纤的模式选择耦合器,并用三维模型分别进行模拟,分析了纤芯间距及熔融度对模式耦合效率的影响及各模式选择耦合器的工作波长带宽,选择合适的结构参数在1.55 μm 波长附近实现了从基模到高阶模式的有效转换,不同的模式从不同的端口输出,减少了模式之间的串扰.此方法也能够被推广到基模和更高阶模式的转换.在实验上采用对称和非对称熔融拉锥方式,通过控制拉锥机的拉伸速度及火焰温度拉制出 2×2 模式选择耦合器,分别实现了基模到 LP_{11} , LP_{21} 模式的转换.实验结果与模拟结果基本一致,验证了模拟的可借鉴性,所拉制的耦合器由于其较高的模式转换效率,较低的模式串扰,可用于模分复用传输及传感系统中.

参考文献

- [1] Essiambre R, Kramer G, Winzer P J, Foschini G J 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 662
- [2] Essiambre R, Mecozzi A 2012 *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference* Los Angeles, California, March 4–8, 2012 pOW3D.1
- [3] Essiambre R, Tkach R W 2012 *Proc. IEEE* **100** 1035
- [4] Yan L S, Liu X, Shieh W 2011 *IEEE Photon. J.* **3** 325
- [5] Yao S C, Fu S N, Zhang M M, Tang M, Shen P, Liu D M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144215 (in Chinese) [姚殊畅, 付松年, 张敏明, 唐明, 沈平, 刘德明 2013 物理学报 **62** 144215]
- [6] Chan F Y M, Lau A P T, Tam H Y 2012 *Opt. Express* **20** 4548
- [7] Lin Z, Zheng S W, Ren G B, Jian S S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064214 (in Chinese) [林桢, 郑斯文, 任国斌, 简水生 2013 物理学报 **62** 064214]
- [8] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, Bolle C, Sierra A, Mumtaz S, Esmaelpour M, Burrows E C, Essiambre R J, Winzer P J, Peckham D W, McCurdy A H, Lingle R 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 521
- [9] Sorin W V, Kim B Y, Shaw H J 1986 *Opt. Lett.* **11** 581
- [10] Xie Y W, Fu S N, Zhang M M, Tang M, Shum P, Liu D M 2013 *Opt. Commun.* **306** 185
- [11] Lai K, Leon-Saval S G, Witkowska A, Wadsworth W J, Birks T A 2007 *Opt. Lett.* **32** 328
- [12] Witkowska A, Leon-Saval S G, Pham A, Birks T A 2008 *Opt. Lett.* **33** 306
- [13] Tsekrekos C P, Syvridis D 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 2461
- [14] Ismaeel R, Lee T, Oduro B, Jung Y M, Brambilla G 2014 *Opt. Express* **22** 11610
- [15] Gabriel P B, Katharina H, Henrik T, Peter W, Sayinc H, Morgner U, Neumann J, Kracht D 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 2382
- [16] Huang W P, Xu C L 1993 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **29** 2639
- [17] Huang W P 1994 *Opt. Soc. Am. A* **11** 963

Design and experimental study of mode selective all-fiber fused mode coupler based on few mode fiber*

Xiao Ya-Ling Liu Yan-Ge[†] Wang Zhi Liu Xiao-Qi Luo Ming-Ming

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(Received 21 April 2015; revised manuscript received 26 May 2015)

Abstract

Three types of all-fiber mode-selection couplers based on fused few-mode fibers (FMFs) are proposed and demonstrated. The specific mode conversions are achieved with appropriate parameters, keeping to the coupling mode theory. LP_{01} mode is selectively converted into the LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} mode via a 2×2 fused fiber coupler composed of single-mode fiber (SMF) and FMF. By changing the preset parameters in fabrication, mode conversions are also realized between the LP_{01} and the mixed high order modes. Moreover, conversions from the LP_{01} mode to other higher order modes are implemented as well in a 3×3 fiber coupler comprising FMF-SMF-FMF structures. Besides, different modes are simultaneously obtained in separated channels to reduce modal crosstalk. Distinguished from other techniques, symmetric and asymmetric fused biconical taper are employed in this paper. The 2×2 fiber coupler achieves the conversion from LP_{01} mode to a single higher order mode such as LP_{11} or LP_{21} mode over a broadband spectral range from 1530 nm to 1560 nm. Meanwhile, the mode conversion efficiency exceeding 80% is recorded in experiment, while the insertion loss remains as low as 0.8 dB. Through the comparison with all-fiber mode-selection couplers reported, the relationship between fusion-degree and conversion efficiency is further studied. The experimental results are consistent with the numerical simulations. In addition, the coupler based mode-selection with lower insertion loss and higher conversion efficiency shows potential applications in mode-division multiplexing and sensing systems.

Keywords: fiber optics, few mode fiber, mode selective coupler, fused biconical taper

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

DOI: [10.7498/aps.64.204207](https://doi.org/10.7498/aps.64.204207)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61322510, 11174154) and the Key Program of the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 12JCZDJC20600).

[†] Corresponding author. E-mail: ygliu@nankai.edu.cn