

基于矢量模式的全光纤模式选择耦合器

郭英豪^{1,2}, 刘美^{1,2}, 汤敏^{1,2}, 任文华^{1,2}, 任国斌^{1,2*}¹北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044;²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 100044

摘要 提出了一种基于矢量模式的全光纤模式选择耦合器, 该耦合器由一个单模光纤和一个空气芯环形少模光纤组成。基于耦合模理论, 研究了不同参数对耦合特性的影响, 并且详细分析了纤芯间距对高阶模式间的串扰和工作带宽的影响。结果表明, 在相位匹配条件下, 该矢量模式选择耦合器可高效地实现基模与特定高阶模的耦合; 通过改变耦合器的纤芯间距, 可以调控模式间的串扰和工作带宽之间的平衡关系。该模式选择耦合器可直接实现基模到高阶矢量模式的高效转换, 能降低光通信系统的插损和复杂度, 在光纤激光器、光镊和模分复用系统中具有潜在的应用价值。

关键词 光纤光学; 模分复用; 相位匹配; 矢量模式; 模式选择耦合器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0306004

1 引言

人工智能、云计算和第五代无线通信系统等技术的迅速发展对现有的光纤通信信道容量提出了更高的要求^[1-4], 而传统单模光纤的传输容量逼近理论香农极限, 面临“带宽耗尽”的问题。空分复用是利用光场的空间分布特性进行复用的技术, 该复用技术有望进一步提升光通信系统的传输容量^[5-6]。模分复用是空分复用中的一种较为高效的实现方法, 该技术利用模式的正交性, 将各个单一模式作为独立的信道, 进而提升光通信系统的传输容量。

模式转换与耦合器件是模分复用技术中的两个关键器件。目前可用于实现模式转换的器件主要包括长周期光纤光栅 (LPG)^[7-8]、布拉格光栅 (FBG)^[9]、光子灯笼 (PL)^[10] 和模式选择耦合器 (MSC)^[11-13]。光纤光栅是通过特定方法对光纤纤芯进行轴向折射率调制而制备的一种衍射光栅, 现已发展为广泛应用于光纤通信和光纤传感等领域的一种成熟技术^[14]。基于少模光纤的 LPG 可以将纤

芯中传输的基模耦合到同向传输的高阶模中, 而基于少模光纤的 FBG 可在特定波长处将前向传输的基模耦合到后向传输的纤芯高阶模中。PL 是将多根单模纤芯或少模纤芯连接到单根多模纤芯的一种低损器件, 但其技术发展还不够成熟, 信道数量、插损和串扰等方面的性能还无法达到实际应用的要求。相较于以上模式转换器件, 模式选择耦合器兼具固有的低串扰和高模式选择性等优越性能。Park 等^[15]报道了一种由级联的模式选择耦合器组成的全光纤模式复用器, 该模式复用器实现了四个模式的转换 (标量基模 LP_{01} 转换为高阶标量模式 LP_{11} , LP_{02} , LP_{21}), 适用于 1515~1590 nm 波段且最低耦合效率 > 55%。Zhang 等^[16]提出了一个基于椭圆环形芯光纤结构的模式选择耦合器, 该耦合器可级联成一个七模复用器 (七模包含标量基模 LP_{01} 和高阶标量模式 LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{21a} , LP_{21b} , LP_{31a} , LP_{31b} , 其中 a、b 表示模式的两个偏振态)。在 C 波段, 所有模式的转换效率均 > 64% 且消光比均 > 15 dB。Yao 等^[17]报道了一个在可见波长下基于全光纤耦合器的环形波数生成器和多路复用器, 该耦合器可

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-06-08; 录用日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金 (62075008)

通信作者: *gbren@bjtu.edu.cn

将基模(LP_{01})转换为高阶模(LP_{11}),通过分别控制高阶模的偏振和相位,可得到圆柱矢量波束和圆偏振轨道角动量。上述模式转换器均是关于线偏振模式的转换,关于矢量模式转换的研究鲜有报道。

本文提出了一种基于矢量模式的 MSC,该矢量 MSC 由一个普通单模光纤(SMF)和一个空气芯环形少模光纤(ACF)组合而成。根据相位匹配条件,该耦合器可以通过单模光纤纤芯半径的选择实现基模(矢量基模 HE_{11})到特定高阶矢量模式(二阶矢量模式 $TE_{01}, HE_{21}, TM_{01}$)的转换。研究了耦合器参数对其耦合特性的影响,并对模式间的串扰和工作带宽进行了详细的分析。该矢量 MSC 在模分复用^[18]、光镊和光纤激光器^[19-20]等领域中具有潜在应用价值。

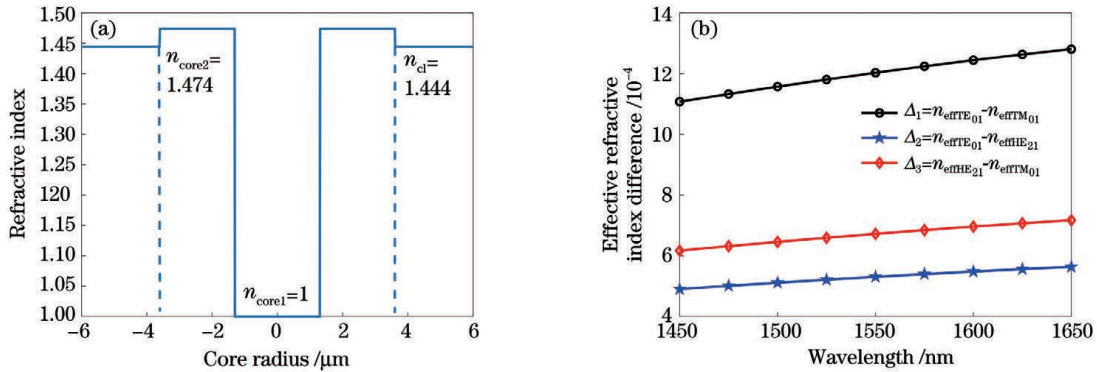


图 1 空气芯环形少模光纤。(a) ACF 横截面上的折射率分布;(b) ACF 所支持的高阶模式之间的有效折射率差
Fig. 1 Air-core ring few mode fiber. (a) Cross-sectional refractive index distribution of ACF; (b) effective refractive index difference between high order modes supported by ACF

图 2 所示为 MSC 结构图。矢量 MSC 包含一个单模光纤和一个 ACF, D 代表两根光纤的纤芯间距。在 SMF 中,纤芯半径为 R_c (由基模到特定高阶模的转换所确定),包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$,纤芯和包

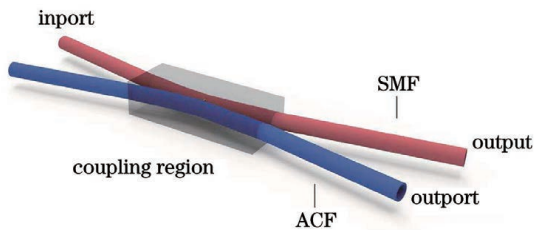


图 2 矢量 MSC 的结构示意图
Fig. 2 Structural diagram of vector MSC

2 基本原理

2.1 MSC 结构

为了实现矢量模式的转换,用于模式耦合的光纤应满足以下条件:1)该光纤应支持用于耦合的矢量模式;2)同阶简并的矢量模式之间的有效折射率差应 $> 10^{-4}$,从而实现简并模式在光纤中的稳定传输。这里我们采用了一种空气芯环形少模光纤,其结构如图 1(a)所示,空气芯、高折射率环及包层的半径依次为 $1.3, 3.6, 62.5 \mu\text{m}$,其折射率分别为 $n_{\text{core1}}=1, n_{\text{core2}}=1.474, n_{\text{cl}}=1.444$ 。由图 1(b)可知,该 ACF 在 C 波段支持用于耦合的四个矢量模式,且高阶矢量模式之间的有效折射率差均 $> 4 \times 10^{-4}$,故该 ACF 光纤满足矢量模式转换的条件,其中 $n_{\text{effTE01}}, n_{\text{effTM01}}, n_{\text{effHE21}}$ 分别为三个二阶矢量模式 $TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}$ 在对应波长下的有效折射率。

层折射率分别为 1.46 和 1.444。在制作方面,该矢量 MSC 可通过侧抛法制得^[15],即将两根光纤去除涂覆层后,将其分别放到石英基片的弧形槽内通过固化胶固化,然后将其抛磨至纤芯的消逝场区域,再将两石英基片靠拢在一起,使得光纤的消逝场重合,此时两个消逝场会相互作用,从而发生耦合。

2.2 耦合模理论

根据耦合模理论,当 SMF 中的基模和 ACF 中的高阶模满足相位匹配条件(即相位失配 $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = 0$,其中 β_1 和 β_2 分别是 SMF 和 ACF 中模式的传输常数)时,基模的能量将完全耦合到高阶模中^[21]。耦合器的耦合模方程^[22]可写成

$$\frac{dA}{dz} + c_{12} \frac{dB}{dz} \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z] + j\chi_1 A + j\kappa_{12} B \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z] = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dB}{dz} + c_{21} \frac{dA}{dz} \exp [+j(\beta_2 - \beta_1)z] + j\chi_2 A + j\kappa_{21} B \exp [+j(\beta_2 - \beta_1)z] = 0, \quad (2)$$

式中: A 和 B 分别为用于耦合的波导 I 和波导 II 中模式的振幅系数(波导 I、波导 II 分别代表 SMF、ACF); κ_{mn} 是模式互耦合系数($m, n = 1, 2$), 表示波导 m 和波导 n 在波导 m 横截面上模场的空间重叠; χ_m 是模式自耦合系数, 表示波导 m 的模场在波导 n 横截面上的空间重叠; c_{mn} 是波导之间的对接耦合系数^[23]。

在绝大多数的研究中, 特别是定向耦合器的分析研究中, 通常会忽略对接耦合系数和自耦合系数的影响。然而, 在两波导耦合较强的情况下, 对接耦合系数和自耦合系数会对耦合结果有着非常大的影响^[24]。为了准确分析矢量模式转换, 耦合模方程中考虑对接耦合系数和自耦合系数, 其解析解^[25]可表示为

$$A(z) = \left\{ \left[\cos(Qz) + j \frac{\hat{\delta}}{Q} \sin(Qz) \right] A(0) - j \frac{k_a}{Q} \sin(Qz) B(0) \right\} \times \exp [-j(\hat{\delta} - \alpha_a)z], \quad (3)$$

$$B(z) = \left\{ -j \frac{k_b}{Q} \sin(Qz) A(0) + \left[\cos(Qz) - j \frac{\hat{\delta}}{Q} \sin(Qz) \right] B(0) \right\} \times \exp [+j(\hat{\delta} + \alpha_b)z], \quad (4)$$

式中:

$$k_a = \frac{k_{12} - c_{12} \chi_2}{1 - |c_{12}|^2}, \quad (5)$$

$$k_b = \frac{k_{21} - c_{12}^* \chi_1}{1 - |c_{12}|^2}, \quad (6)$$

$$\alpha_a = \frac{k_{21} c_{12} - \chi_1}{1 - |c_{12}|^2}, \quad (7)$$

$$\alpha_b = \frac{k_{12} c_{12}^* - \chi_2}{1 - |c_{12}|^2}, \quad (8)$$

$$\hat{\delta} = \delta + \frac{\alpha_a - \alpha_b}{2}, \quad (9)$$

$$\delta = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2}, \quad (10)$$

$$Q = \sqrt{k_a k_b + (\hat{\delta})^2}, \quad (11)$$

式中: $A(0)$ 、 $B(0)$ 分别为波导 I、波导 II 在 $z=0$ 处的振幅系数; δ 为发生耦合的两个模式的传输常数差; 耦合系数之间应满足公式 $k_{21} = k_{12}^* + 2\delta c_{12}^*$, 其中 k_{12} 为波导 I 和波导 II 中的模式互耦合系数, * 表示共轭。

在绝大多数情况下, 两个波导中的模式在 $z=0$ 处开始发生耦合, 所以我们定义初始条件为 $A(0) = A_0$, $B(0) = 0$, 则沿 z 轴的光功率^[25]可表示为

$$P_a(z) = \frac{|A(z)|^2}{|A_0|^2} = 1 - \frac{k_a k_b}{Q^2} \sin^2(Qz), \quad (12)$$

$$P_b(z) = \frac{|B(z)|^2}{|A_0|^2} = \left(\frac{k_b}{Q} \right)^2 \sin^2(Qz), \quad (13)$$

式中: $P_a(z)$ 和 $P_b(z)$ 分别为波导 I 和波导 II 中模

式的传输功率(下标 a、b 分别代表波导 I、波导 II)。由(12)、(13)式可知, 功率在耦合区域的变化具有周期性, 并定义第一次基模的功率完全耦合到高阶模中时耦合区域的长度为耦合长度 L_c , 其表达式为

$$L_c = \frac{\pi}{2Q} = \frac{\pi}{2\sqrt{k_a k_b + (\hat{\delta})^2}}. \quad (14)$$

3 分析与讨论

3.1 MSC 模式耦合特性

根据模式的不同偏振, 光纤中的矢量模式可以分为-P 模和-S 模, 相同偏振的基模和高阶模之间才能发生耦合^[26], 本文将主要围绕-P 模展开讨论, -S 模因相同的耦合原理而具有类似的耦合特性。

根据相位匹配条件, 光纤的纤芯半径会改变其所支持的模式的传输常数。通过改变纤芯半径, 可在不同纤芯半径处实现基模到特定高阶模的转换。本文利用有限元法对所提出的模型进行仿真, 通过改变 SMF 的纤芯半径, 获得在 1550 nm 波长下基模与高阶模相位匹配的纤芯半径 R_c 。

图 3 为 1550 nm 波长处基模转换为特定高阶模时所对应的 SMF 纤芯半径。由图 3 可知, SMF 基模与 ACF 中高阶模 TE_{01} , HE_{21} , TM_{01} 实现相位匹配时的 SMF 半径分别为 3.12, 3.38, 3.62 μm 。在 1550 nm 波长处, 根据光纤归一化频率公式 $V = \frac{2\pi}{\lambda} r_{\infty} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ (λ 为工作波长, r_{∞} 为纤芯半径, n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层的折射率), 利用图 3 给出的三个纤芯半径参数, 计算得到三个归一化频率分

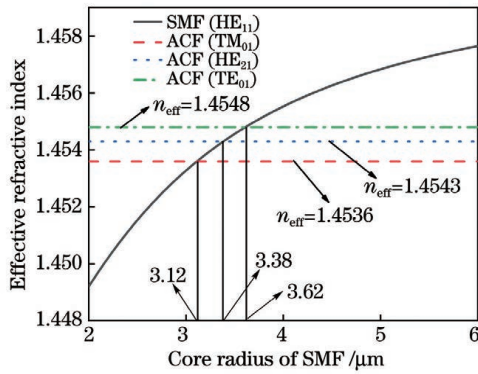
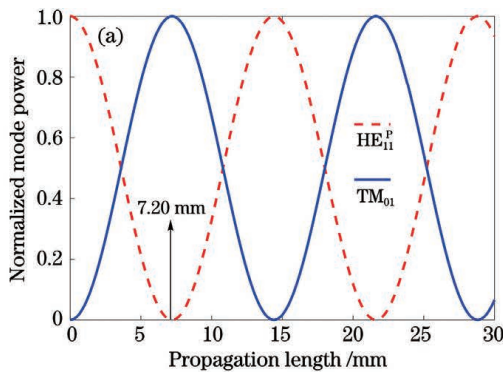


图 3 1550 nm 波长处不同 SMF 纤芯半径下的 SMF 基模有效折射率及 SMF 基模和 ACF 中每个高阶模的匹配
Fig. 3 Effective refractive index of fundamental mode in SMFs with different core radii and matching between fundamental mode in SMF and each high order mode in ACF at 1550 nm wavelength

别为 3.05、3.30 和 3.54, 此时光纤最高支持二阶模式的传输。然而, 当标准单模光纤与此光纤中心对准熔接时, 由于模式场的对称性, 在此光纤中只有



HE_{1n} (径向阶数 $n=1, 2, 3, \dots$) 模式被激励, 因此该光纤中只有基模可以被激励, 并在 MSC 中实现向特定高阶矢量模式的转换。

以 TM_{01} 为例对矢量模式选择耦合器中的模式转换特性进行分析, 图 4 所示为矢量基模 $HE_{11-P}(HE_{11}^P)$ 模和高阶模 TM_{01} 的模式转换关系。如图 4(a) 所示, 当 SMF 纤芯半径 R_c 为 $3.12 \mu\text{m}$ 时, 矢量 MSC 在 1550 nm 波长处可以实现基模 HE_{11} 和高阶模 TM_{01} 的相位匹配。两个模式的功率沿 z 轴作周期性变换, 当 $z=L_c=7.20 \text{ mm}$ 时, 基模和高阶模实现第一次 100% 功率转换。图 4(b) 所示为耦合长度处矢量 MSC 中基模和 TM_{01} 模随波长变化的透射谱。可以看出, 在 1550 nm 波长处, 相位匹配条件满足, 实现了两个模式的功率转换, 而在其他波长处, 随着相位失配的增加, 耦合效率迅速降低。在 1543~1556 nm 波段, 耦合效率均 $>60\%$, 且 3 dB 带宽为 13 nm, 因此该矢量 MSC 可以实现基模到高阶模之间的高效率转换。

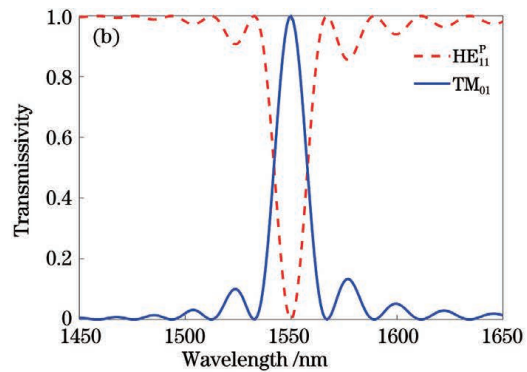


图 4 基模 HE_{11}^P 与高阶模 TM_{01} 间的功率转换及透射谱。(a) 1550 nm 波长处矢量 MSC 中两模式沿 z 轴的转换; (b) $z=L_c$ 处两模式的转换随波长的变化

Fig. 4 Power conversion between fundamental mode HE_{11}^P and high order mode TM_{01} and transmission spectra. (a) Conversion between two modes in vector MSC along z -direction at 1550 nm; (b) conversion between two modes versus wavelength at $z=L_c$.

耦合长度与功率耦合效率是表征耦合器特性的两个重要指标。耦合长度的定义如(14)式所示, 而(13)式中的系数 $(\frac{k_b}{Q})^2$ 定义为功率耦合效率。耦合器的参数以及工作波长的变化将影响耦合系数, 进而影响耦合长度和功率耦合效率。这里以二阶矢量模式 $HE_{21-P}(HE_{21}^P)$ 模为例, 取 SMF 纤芯半径 $R_c=3.38 \mu\text{m}$, 此时耦合器的相位匹配波长为 1550 nm。耦合长度、功率耦合效率与工作波长和纤芯间距的关系如图 5 所示。图 5(a) 为功率耦合效率随工作波长和纤芯间距的变化。可以看出, 首先, 在相同纤芯间距的情况下, 功率耦合效率随着工

作波长的变化近似呈高斯分布。这是因为当工作波长趋于 1550 nm 时, 相位失配逐渐趋于零, 所以功率耦合效率在 1550 nm 处达到最大; 当工作波长远离 1550 nm 时, 相位失配逐渐增大, 功率耦合效率不断减小。其次, 在相位匹配波长附近, 高耦合效率区域随着纤芯间距的增大而减小。这是因为纤芯间距增大时, 发生耦合的两个模式的相互作用变小, 耦合系数变小, 当相位失配增加时, 功率耦合效率会迅速降低, 最终导致高耦合效率区域变窄。图 5(b) 为耦合长度随工作波长和纤芯间距的变化。可以看出, 首先在相同纤芯间距的情况下, 耦合长度随工作波长的变化近似呈高斯分布, 分析过程与上述类似。

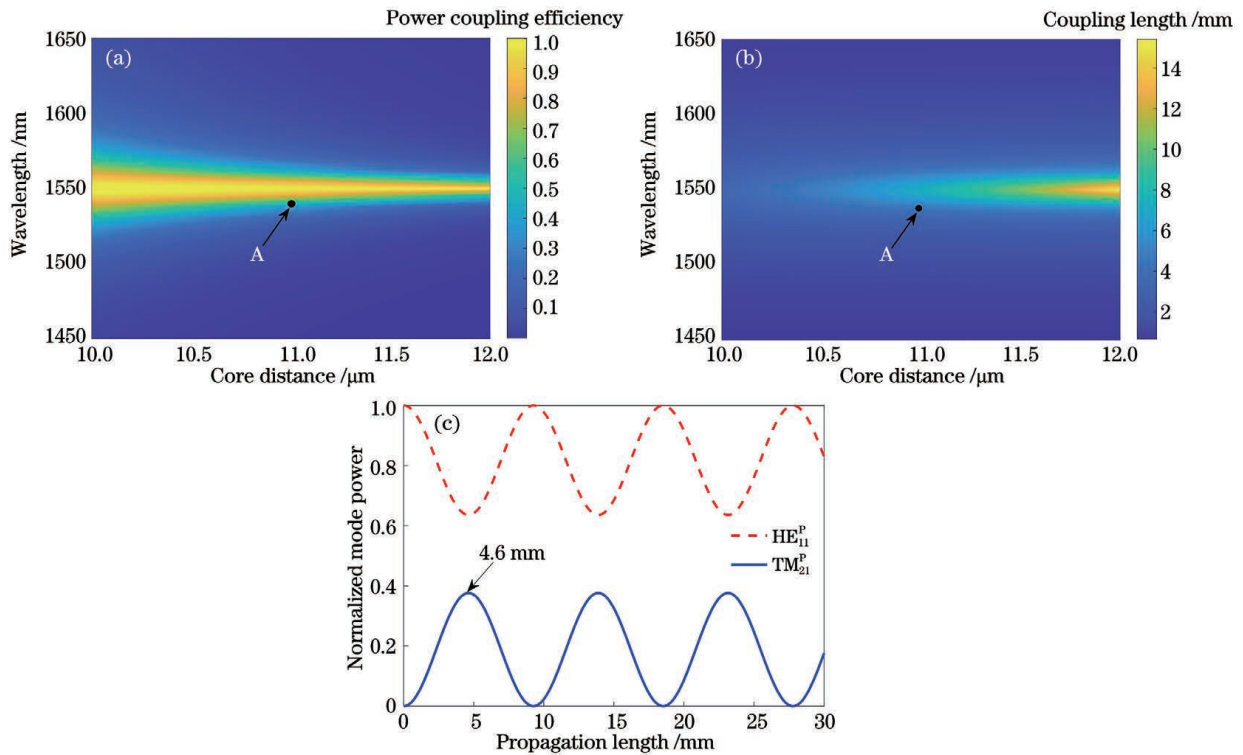


图 5 不同条件下的功率耦合效率和耦合长度。(a)功率耦合效率随波长和纤芯间距的变化;(b)耦合长度随波长和纤芯间距的变化;(c)A 点处的模式功率转换

Fig. 5 Power coupling efficiency and coupling length under each condition. (a) Power coupling efficiency versus wavelength and core distance; (b) coupling length versus wavelength and core distance; (c) mode power conversion at point A

其次在相位匹配波长处,耦合长度随纤芯间距的增大而增大,这是因为当纤芯间距增大时,发生耦合的两个模式间的相互作用变小,耦合系数变小,则实现功率全耦合所需要的耦合长度相应增大。图 5(a)、(b)中的 A 点表示在 1538 nm 波长、11 μm 纤芯间距处的功率耦合效率和耦合长度分别为 0.376 mm 和 4.6 mm。图 5(c)显示了耦合器输出端单模光纤中的基模与 ACF 中 HE₂₁^P 模的功率随耦合器长度的变化。由于在 1538 nm 波长处不满足严格的相位匹配条件,因此基模的功率仅有 37.6% 耦合到了 HE₂₁^P 模中。

以上是以 HE₂₁^P 模式为例,并对其进行的耦合特性的分析。TE₀₁、TM₀₁ 有相同的耦合原理,故具有类似的耦合特性。

3.2 纤芯间距对带宽和串扰的影响

由以上分析可知,纤芯间距会影响耦合系数的变化,从而影响工作带宽和模式间的串扰。为了研究不同纤芯间距对带宽的影响,以 HE₁₁^P 和 HE₂₁^P 之间的模式耦合为例,通过改变纤芯间距(10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0 μm),得到 $R_c = 3.38 \mu\text{m}$ 情况下 HE₂₁^P 模式对应的带宽。如图 6 所示,随着纤芯间距

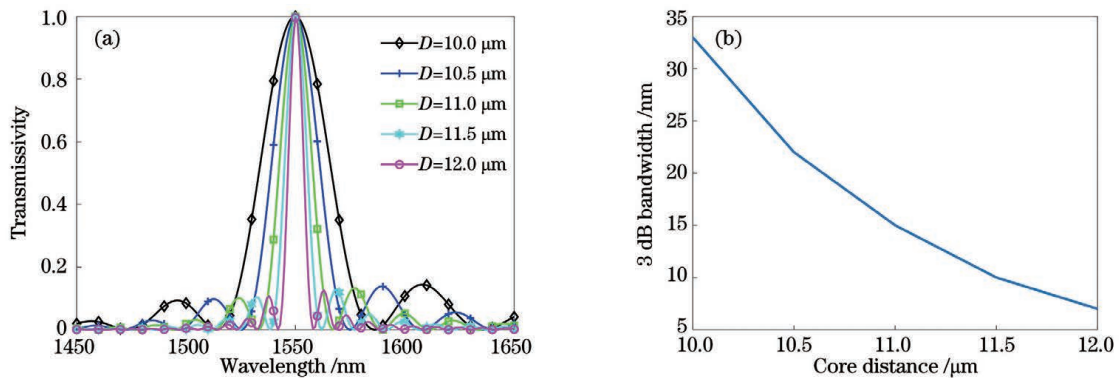


图 6 不同纤芯间距下的耦合器的带宽。(a)带宽随纤芯间距的变化;(b)3 dB 带宽随纤芯间距的变化

Fig. 6 Bandwidth of coupler at each core distance. (a) Bandwidth versus core distance; (b) 3 dB bandwidth versus core distance

的增大, HE_{21}^p 的 3dB 带宽依次为 33, 22, 15, 10, 7 nm, 工作带宽依次变窄。这是由于随着纤芯间距的增大, 模式的重叠空间减小, 从而导致两个模式之间的相互作用变小, 当相位失配增加时, 两个模式的耦合效率会迅速降低, 最终导致工作带宽变窄。

通过改变纤芯间距, 可忽略模式间的串扰。研究了不同纤芯间距对串扰的影响, 结果如图 7 所示。通过改变纤芯间距 (10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0 μm), 得到 R_c 为 3.38 μm 的情况下, SMF 基模和 ACF 高阶模间的耦合在对应纤芯间距下的串扰。表 1 为 C 波段 TE_{01} 和 TM_{01} 的最大串扰随纤

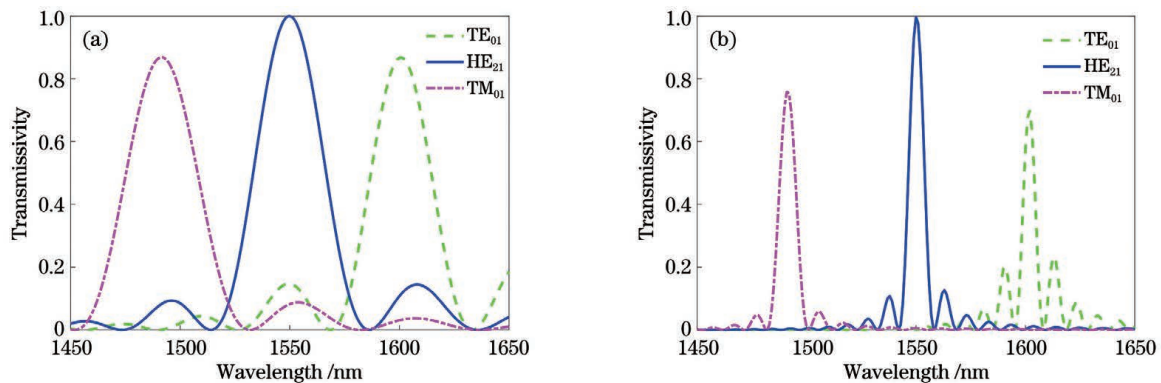


图 7 不同纤芯间距下的串扰。(a) 10 μm ; (b) 12 μm

Fig. 7 Crosstalk at each core distance. (a) 10 μm ; (b) 12 μm

表 1 C 波段 TE_{01} 和 TM_{01} 的最大串扰随纤芯间距的变化
Table 1 Maximum crosstalk of TE_{01} and TM_{01} versus core distance at C band

$D / \mu\text{m}$	Maximum crosstalk of $TE_{01} / \%$	Maximum crosstalk of $TM_{01} / \%$
10.0	14.6	8.7
10.5	10.0	7.8
11.0	5.0	2.7
11.5	2.8	1.3
12.0	1.1	0.5

通过改变矢量 MSC 的纤芯间距, 可以调控工作带宽和高阶模式之间的串扰。随着纤芯间距的增大, 模式之间的串扰将会减小, 然而工作带宽也变窄, 因此在实际应用中, 应根据需要控制纤芯间距, 在模式串扰和工作带宽之间寻求平衡。

4 结 论

提出了可直接实现矢量模式转换的全光纤模式选择耦合器, 该矢量模式选择耦合器由一个普通单模光纤和一个空气芯环形少模光纤组成, 并且在

芯间距的变化。由图 7(a) 知, 在 C 波段, 当纤芯间距 D 为 10 μm 时, HE_{11} 模式主要与 HE_{21} 模式发生耦合, 而 TE_{01} 和 TM_{01} 两个模式的最大耦合效率分别为 14.6% 和 8.7%, 高阶模式之间的串扰不可忽略。随着纤芯间距的增大, 在图 7(b) 中的 C 波段, 当纤芯间距 D 为 12 μm 时, TE_{01} 和 TM_{01} 两个模式的最大耦合效率降低, 最低分别为 1.1% 和 0.5%, 则可忽略高阶模式之间的串扰。纤芯间距越大, 高阶模式之间的串扰越小, 这是由于纤芯间距的增大导致高阶模式的工作带宽变窄, 从而高阶模式之间的串扰降低。

同单模光纤纤芯半径处可以实现基模 (HE_{11}) 向特定高阶矢量模式 (TE_{01} , HE_{21} , TM_{01}) 的转换。根据耦合模理论, 研究了该矢量模式选择耦合器的耦合特性以及纤芯间距对模式间串扰和工作带宽的影响。结果表明, 该矢量模式选择耦合器在 1543 ~ 1556 nm 波长范围内可实现高效率模式耦合, 通过改变矢量 MSC 的纤芯间距, 可以调控模式间的串扰和工作带宽, 并在纤芯间距为 11 μm 处实现了低串扰和宽带的模式转换。该矢量 MSC 有着较高的耦合效率, 可以应用在光纤激光器、光镊和矢量模分复用系统中。

参 考 文 献

- [1] Guan B B, Qin C, Scott R P, et al. Polarization diversified integrated circuits for orbital angular momentum multiplexing [C] // 2015 IEEE Photonics Conference (IPC), October 4-8, 2015, Reston, VA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 649-652.
- [2] Li S H, Wang J. Performance evaluation of analog signal transmission in an orbital angular momentum multiplexing system [J]. Optics Letters, 2015, 40 (5): 760-763.

- [3] Wang X H, Song Y X, Zhang Q W, et al. Interconnecting data based on vortex beams by adjusting the ellipticity of a ring-core fiber[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7492-7500.
- [4] Liu J, Li S M, Du J, et al. Performance evaluation of analog signal transmission in an integrated optical vortex emitter to 3.6-km few-mode fiber system[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 1969-1972.
- [5] Essiambre R J, Ryf R, Fontaine N K, et al. Breakthroughs in photonics 2012: space-division multiplexing in multimode and multicore fibers for high-capacity optical communication[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 0701307.
- [6] Jin W X, Ren G B, Pei L, et al. Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(2): 024210.
靳文星, 任国斌, 裴丽, 等. 环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析[J]. *物理学报*, 2017, 66(2): 024210.
- [7] Huang W, Liu Y G, Wang Z, et al. Multi-component-intermodal-interference mechanism and characteristics of a long period grating assistant fluid-filled photonic crystal fiber interferometer[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5883-5894.
- [8] Zhou Q, Zhang W G, Chen L, et al. Bending vector sensor based on a sector-shaped long-period grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(7): 713-716.
- [9] Gao Y, Sun J Q, Chen G D, et al. Demonstration of simultaneous mode conversion and demultiplexing for mode and wavelength division multiplexing systems based on tilted few-mode fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 9959-9967.
- [10] Fontaine N K, Leon-Saval S G, Ryf R, et al. Mode-selective dissimilar fiber photonic-lantern spatial multiplexers for few-mode fiber[C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), September 22-26, 2013, London. London: IET, 2013: 1-3.
- [11] Ismaeel R, Lee T, Oduro B, et al. All-fiber fused directional coupler for highly efficient spatial mode conversion[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11610-11619.
- [12] Chang S H, Chung H S, Fontaine N K, et al. Mode division multiplexed optical transmission enabled by all-fiber mode multiplexer[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14229-14236.
- [13] Gao Y Y, Cui J, Ge D W, et al. A degenerate-mode-selective coupler for stable DSP-free MDM transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(17): 4410-4420.
- [14] Zhang H W, Mao B W, Han Y, et al. Generation of orbital angular momentum modes using fiber systems[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(5): 1033.
- [15] Park K J, Song K Y, Kim Y K, et al. Broadband mode division multiplexer using all-fiber mode selective couplers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3543-3549.
- [16] Zhang H, Wang Z C, Xi L X, et al. All-fiber broadband multiplexer based on an elliptical ring core fiber structure mode selective coupler[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(12): 2994-2997.
- [17] Yao H, Shi F, Wu Z Y, et al. A mode generator and multiplexer at visible wavelength based on all-fiber mode selective coupler[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(4): 973-981.
- [18] Wang L L, Zhang D M, Lian T H, et al. Polymeric waveguide thermo-optic switch based on directional coupler[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0704002.
王力磊, 张大明, 廉天航, 等. 基于定向耦合结构的聚合物波导热光模式开关研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0704002.
- [19] Cheng P K, Shi F, Wang T, et al. Fiber mode switchable Q-switched laser based on mode selective coupler[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1201001.
程培康, 石帆, 王腾, 等. 基于模式选择耦合器的光纤模式可切换调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1201001.
- [20] Li X F, Li Z, Wu W M, et al. Transverse-mode switchable few-mode ring fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1406002.
李晓风, 李哲, 吴文矛, 等. 横向模式可切换的少模环形光纤激光器[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1406002.
- [21] Yao S Z, Ren G B, Shen Y, et al. Tunable orbital angular momentum generation using all-fiber fused coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(1): 99-102.
- [22] Ramachandran S, Kristensen P. Optical vortices in fiber[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 455-474.
- [23] Marcatili E. Improved coupled-mode equations for dielectric guides[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(6): 988-993.
- [24] Hardy A, Streifer W. Coupled mode theory of parallel waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(5): 1135-1146.
- [25] Kien F L, Ruks L, Nic Chormaic S, et al. Coupling between guided modes of two parallel nanofibers[J].

New Journal of Physics, 2020, 22(12): 123007.

coupled mode theory for tilted fiber gratings [J].

[26] Lu Y C, Huang W P, Jian S S. Full vector complex

Optics Express, 2010, 18(2): 713-726.

All-Fiber Mode Selective Coupler Based on Vector Modes

Guo Yinghao^{1,2}, Liu Mei^{1,2}, Tang Min^{1,2}, Ren Wenhua^{1,2}, Ren Guobin^{1,2*}

¹*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;*

²*Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

Abstract

Objective Mode division multiplexing has gained considerable attention for its ability to increase the communication capacity. The individual mode in a fiber can act as a separate communication channel in the mode division multiplexing. Mode conversion devices are the key elements for mode division multiplexing. The fiber-based mode conversion devices mainly include long-period fiber gratings, fiber Bragg gratings, photonic lanterns, and mode selective couplers. Compared with other mode conversion devices, the mode selective coupler has inherent low crosstalk and high mode selectivity. However, the researches on mode selective couplers are mainly focused on the conversion of linear polarization modes by far. There are few reports on the conversion of vector modes, and the relationship between crosstalk among high order vector modes and working bandwidth has rarely been explored. In this paper, an all-fiber mode selective coupler based on vector modes is proposed. This vector mode selective coupler can directly realize the coupling between the fundamental mode and the high order vector modes with a high conversion efficiency. Moreover, there is a trade-off between depressing the crosstalk and extending the working bandwidth of the vector mode selective coupler. This work can find applications in the fields of fiber lasers, optical tweezers, and mode division multiplexing systems.

Methods In this paper, an all-fiber mode selective coupler based on the vector modes is proposed, which consists of a single mode fiber and an air-core ring few mode fiber. Firstly, the phase matching condition means that two modes have the same mode propagation constant or mode effective index at a certain working wavelength. When the fundamental mode in the single mode fiber and the high order modes in the air-core ring few mode fiber satisfy the phase matching condition, the energy of the fundamental mode is fully coupled into the high order modes. We change the core radius of the single mode fiber to satisfy the phase matching of two modes at a certain working wavelength. The COMSOL software is used to model this vector mode selective coupler. Then, based on the mode-coupling theory, the butt-coupling and the self-coupling are usually ignored in most of the researches. However, the butt-coupling and the self-coupling have significant effects on the coupling results in the case of the strong coupling between two waveguides. In order to accurately analyze the vector mode conversion, the exact solution including the butt-coupling and the self-coupling is adopted in this paper. In addition, we use the COMSOL software to explore the effects of different parameters (such as working wavelength, core radius and core distance) on the coupling coefficients. Finally, to investigate the coupling characteristics (such as coupling length, working bandwidth, and power coupling efficiency) of this vector mode selective coupler, the MATLAB software is employed to solve the coupled mode equations.

Results and Discussions Firstly, according to the phase matching condition, the transmission constant of the fundamental mode in the single mode fiber can be tuned by changing the core radius of this fiber. Therefore, different core radii of the single mode fiber correspond to different mode effective indexes of the HE_{11} mode. When the effective refractive index of the HE_{11} mode matches that of the specific high order mode in the air-core ring few mode fiber (Fig. 3), the power of the HE_{11} mode is coupled into this specific mode (Fig. 4). Second, we investigate the effects of different parameters on coupling length and power coupling efficiency (Fig. 5). Both the power coupling efficiency and the coupling length have an approximate Gaussian distribution with working wavelength at a certain core distance. Moreover, around the phase matching wavelength (1550 nm), the high coupling efficiency region decreases with the increase of core distance, while the coupling length increases. Finally, we explore the

influences of different core distances on working bandwidth (Fig. 6) and crosstalk (Fig. 7) between high order vector modes, and the crosstalk between different modes is listed in Table 1. In Fig. 6, the working bandwidth of the vector mode selective coupler decreases with the increase of core distance. In Fig. 7, as the core distance increases, the crosstalk between different high order vector modes is reduced accordingly. There is a trade-off between depressing the crosstalk and extending the working bandwidth of the vector mode selective coupler. Therefore, the core distance can be controlled as needed to find a balance between the crosstalk and the working bandwidth for different applications.

Conclusions In this paper, an all-fiber mode selective coupler based on vector modes is proposed, which consists of a single mode fiber and an air-core ring few mode fiber. Based on the mode-coupling theory, the coupling characteristics of this vector mode selective coupler are investigated. In addition, we explore the influences of core distance on the crosstalk between high order vector modes and the working bandwidth. The results show that this vector mode selective coupler can realize the coupling from the fundamental mode to the special high order mode with a high coupling efficiency in the wavelength range of 1543–1556 nm. The crosstalk and the working bandwidth can be regulated by changing the core distance. Moreover, the low crosstalk and the wide bandwidth mode coupling are achieved at a core distance of 11 μm . The results in this paper can find applications in fiber lasers, optical tweezers, and mode division multiplexing systems.

Key words fiber optics; mode division multiplexing; phase matching; vector mode; mode selective coupler