

激光与光电子学进展

基于空分复用光纤通信系统模式转换器的研究

钟文博¹, 董昭达¹, 张玲¹, 张克非^{2*}, 王娅欣³¹西南科技大学理学院, 四川 绵阳 621010;²西南科技大学计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010;³电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 611731

摘要 为改善光纤通信系统带宽容量在实际工程应用中面临的局限性, 基于空分复用技术提出一种可分别传输基模与高阶模的光子晶体光纤纤芯结构, 利用虚轴光束传播法得到不同结构参数下相应模式的有效折射率曲线, 通过匹配两种模式的有效折射率曲线, 设计了一种具有非对称双芯结构的光子晶体光纤模式转换器。光波长为 1550 nm 时, 该器件实现了基模(LP₀₁模)与高阶模(LP₀₂模)之间的模式转换, 在较宽的归一化频率范围内模式耦合效率可达 91.98%, 耦合长度约 178.5 μm, 器件直径最大仅 47.6 μm。该结构设计灵活可控, 可满足未来大容量通信系统的需求。

关键词 光通信; 光子晶体光纤; 空分复用; 模式转换器; 虚轴光束传播法

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1106003

Mode Converter of Optical Fiber Communication System Based on Space Division Multiplexing

Zhong Wenbo¹, Dong Zhaoda¹, Zhang Ling¹, Zhang Kefei^{2*}, Wang Yaxin³¹Faculty of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;²School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;³School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract To improve limitations of bandwidth capacity of optical fiber communication system in practical engineering applications, a photonic crystal fiber core structure which is capable of transmitting fundamental and high-order modes is proposed based on space division multiplexing technology. The effective refractive index curves of the corresponding modes under different structural parameters are obtained using the finite-difference imaginary-distance beam propagation method. An asymmetric dual-core photonic crystal fiber mode converter is designed by matching the effective refractive index curves of the two modes. It demonstrates that such an LP₀₁-to-LP₀₂ mode converter can be achieved at the wavelength of 1550 nm. In a wider frequency range, the mode coupling efficiency is above 90%, and the coupling length is about 178.5 μm. The device diameter is 47.6 μm, and the structural design is flexible and controllable, which can meet the needs of future large-capacity communication systems.

收稿日期: 2020-09-17; 修回日期: 2020-10-10; 录用日期: 2020-10-29

基金项目: 四川省大学生创新创业训练基金资助项目(S202010619067)、西南科技大学校级重点教育教学改革与研究项目(19xnzd21)、四川省高等教育人才培养质量和教学改革基金资助项目(19sjjg21)、西南科技大学素质类教改专项(19szjg03)、西南科技大学大学生创新基金项目(CX20-029)、西南科技大学理学院人才培养暨学科竞赛创新基金项目(LX2020020)

*E-mail: zhangkefeijike@163.com

Key words optical communications; photonic crystal fiber; space division multiplexing; mode converter; finite-difference imaginary-distance beam propagation method

OCIS codes 060.2330; 060.5295; 060.2420

1 引言

空分复用(SDM)技术是破解光传输网络带宽危机的一个重要技术方向,在光波频率和偏振态等维度的利用率已接近极限的情况下,以多芯复用(MCM)^[1]、少模复用(FMM)^[2]、轨道角动量模式复用(OAM)^[3]以及少模多芯复用(FM-MCM)^[4]为代表的SDM技术已成为光通信领域学术界和产业界研究关注的焦点,SDM关键技术中的模式转换控制需要借助模式转换器来实现。

根据工作原理的不同,国内外研究类型主要有空间光调制器件匹配型^[5-7]、硅基集成波导型^[8-9]和全光纤型^[10-13]三种。2015年,南安普顿大学的Jung等^[14]通过在单模光纤和少模光纤之间拼接全光纤二进制相位板设计了LP₁₁空间模式转换器,在较宽的波长范围内,插入损耗为4.5 dB,模式消光比大于13 dB。2017年,重庆大学的Yin等^[15]提出将双模光纤中的两个横向应力点作为共线光纤模式耦合器构成模式干涉仪,通过调整两个应力点的间距来自由调整通道间距,将LP₀₁模式在C+L波段的20个通道上转换成LP₁₁模式,转换效率高达99.5%,插入损耗低至0.6 dB。2017年,萨马拉国立大学的Gavrilov等^[16]在少模光纤的端面上基于二进制微浮雕设计了模式转换器,可以高效地形成LP₁₁和LP₂₁模式,纯度超过92%。由于原有模式不受光纤引导,该模式转换器在强弯曲条件下也能保持其模式纯度。同年,上海大学的Zhao等^[17]利用CO₂激光脉冲将长周期光纤光栅写入六模光纤作为模式转换器,成功实现了LP₀₁到LP₁₁、LP₂₁到LP₀₂的模式转换,转换效率均大于90%。2018年,南开大学的Zhang等^[18]基于双模保偏光子晶体光纤设计了一种长周期光纤光栅模式转换器,带宽通过光栅数进行调节,可分离出不同波长的两个线偏振LP_{11a}模式,最高的模式转换

效率超过99%。

综上所述,基于全光纤型模式转换器的显著优势,设计低损耗的光子晶体光纤(PCF)^[19-21]代替传统光纤,既可与其他结构组合制成模式转换器共同实现传输模式的激发与匹配,也可单独制成模式转换器,是提高模式转换效率的重要途径。本文结合PCF独特的光学特性,设计出一种具有双芯结构的PCF模式转换器,在实现传输模式的耦合功能的同时实现了较高的模式转换效率。

2 基模与高阶模的光子晶体光纤纤芯结构特性分析

2.1 基模的纤芯结构与特性分析

本研究选择一种折射率引导型PCF来实现双芯光子晶体光纤(DC-PCF)纤芯中传输模式之间的耦合。选择六边形三角晶格排列空气孔介质柱,晶格周期 Λ 为4 μm ,设置空气孔介质柱直径 d 满足 $d/\Lambda=0.5$,内包层空气孔介质柱直径 d_1 满足 $d_1/\Lambda=0.5$,基质SiO₂和空气孔介质柱折射率分别为 $n_0=1.45$ 、 $n=1.00$,图1为可传输基模的PCF基本结构。

采用虚轴光束传播法(IFD-BPM)求解该基模的有效折射率,表达式为

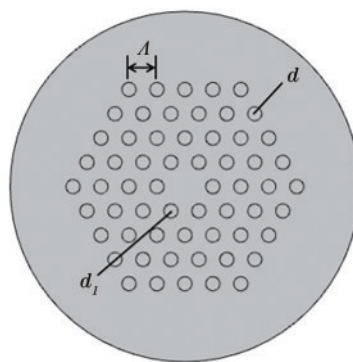


图1 基模PCF几何结构

Fig. 1 Small fiber core

$$n_i(\tau) = n_0 + \frac{\ln \left[\iint \psi(x, y, \tau + \Delta\tau) dx dy \right] - \ln \left[\iint \psi(x, y, \tau) dx dy \right]}{k\Delta\tau}, \quad (1)$$

式中 n_0 为背景材料折射率, n_i 为有效折射率, $\Delta\tau$ 为传播步长。计算该基模有效折射率得到的结果如

图2所示。

为实现DC-PCF两纤芯之间的有效折射率匹

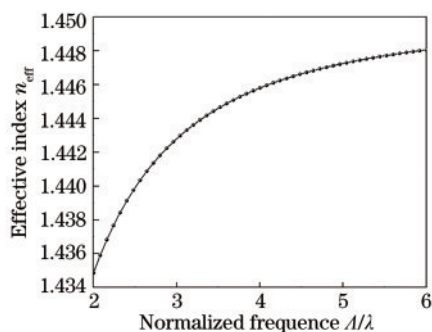


图 2 LP₀₁ 模的有效折射率曲线

Fig. 2 Effective refractive index curve of LP₀₁ mode

配,下面对影响LP₀₁模的有效折射率的各个因素进行讨论。

2.1.1 近芯区空气孔介质柱大小对LP₀₁模的影响

近芯区空气孔介质柱直径定义为 d_1 ,如图 1 所示。其余参数设置不变,分别设置 $d_1/\Lambda=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$,对其有效折射率曲线进行求解,结果如图 3 所示:随着 d_1/Λ 逐渐增大,LP₀₁模的有效折射率

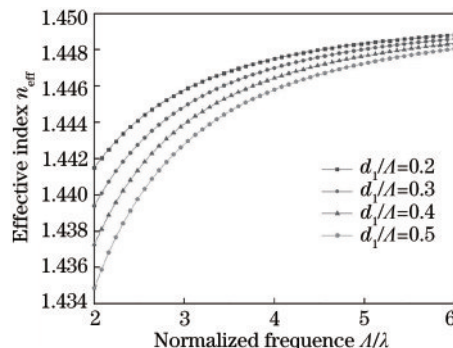


图 3 不同 d_1/Λ 的 LP₀₁ 模有效折射率曲线

Fig. 3 Effective refractive index curves of LP₀₁ modes with different d_1/Λ

值减小;随着归一化频率的增大,有效折射率曲线斜率逐渐减小。

2.1.2 近芯区空气孔介质柱位置对LP₀₁模的影响

保持 2.1 中的基本参数不变,定义近芯区空气孔介质柱偏移方向沿径向向外为正,沿径向向内为负(如图 4 所示),位移量为 Δx ($|\Delta x| < \Lambda$)。

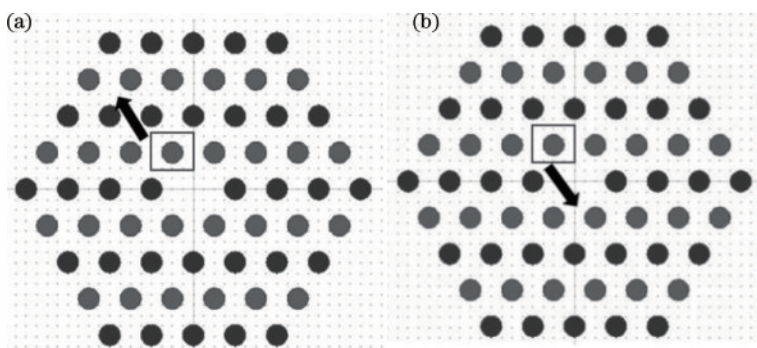


图 4 近芯区空气孔介质柱偏移方向:(a)径向向外;(b)径向向内

Fig. 4 Offset directions of the air hole medium column near the core area. (a) Radially outward; (b) radially inward

设置 Δx 分别为 $+0.1\Lambda, 0, -0.1\Lambda$,对其 LP₀₁ 模的有效折射率曲线进行求解,结果如图 5 所示,可知通过改变近芯区空气孔介质柱的偏移量可以改变

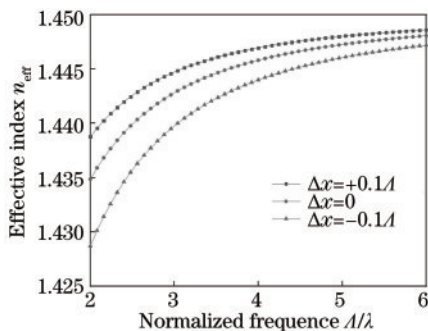


图 5 近芯区空气孔介质柱不同 Δx 的 LP₀₁ 模有效折射率曲线
Fig. 5 Effective refractive index curves of LP₀₁ modes with different Δx in the near-core air hole dielectric column

LP₀₁模的有效折射率的值,且偏移沿径向向外时,有效折射率值增大,偏移沿径向向内时,有效折射率值减小。

2.1.3 近芯区空气孔介质柱折射率对LP₀₁模的影响

保持基模其余参数不变,定义近芯区层空气孔介质柱折射率 n_1 与背景材料折射率 n_0 (1.45) 的差值为 Δn ,设置 Δn 分别为 $-0.15, -0.30, -0.45, -0.60, -0.75$,并对其 LP₀₁ 模有效折射率曲线进行求解,结果如图 6 所示。当近芯区空气孔介质柱折射率值大于普通空气孔介质柱时,随着近芯区空气孔介质柱折射率值的增大,有效折射率值增大。当近芯区空气孔介质柱折射率值小于普通空气孔介质柱时,随着近芯区空气孔介质柱折射率值的减

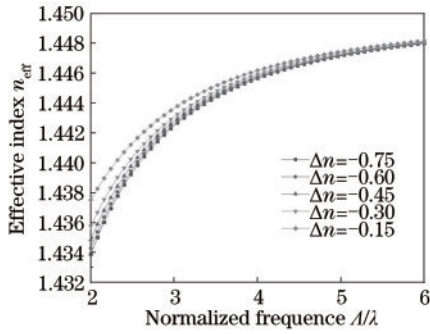


图 6 近芯区空气孔介质柱不同 Δn 的 LP_{01} 模有效折射率曲线

Fig. 6 Effective refractive index curves of LP_{01} modes with different Δn in the near-core air hole dielectric column

小,有效折射率值减小,且减小的幅度远小于当近芯区空气孔介质柱折射率值大于普通空气孔介质柱时增大的幅度。

2.2 高阶模的纤芯结构与特性分析

在 2.1 节 LP_{01} 模结构设计的基础上,选择六边形三角晶格排列空气孔介质柱,晶格周期 Λ 为 $4\ \mu\text{m}$, 基质 SiO_2 和空气孔介质柱的折射率分别为 1.45 和 1.00。空气孔介质柱层数由中心沿径向向外定义为 Ring_i (i 为包层空气孔介质柱第 i 层的序数,PCF 中心的 i 为 0),相应层的直径定义为 d_i ,折射率定义为 n_i 。通过从近芯区开始逐层修改空气孔介质柱的直径,获取高阶模 PCF 结构。 Ring_1 的直径 d_1 取 $d_1/\Lambda=0.3$, Ring_2 的直径 d_2 取 $d_2/\Lambda=0.4$, Ring_3 和 Ring_4 的直径均取 $d/\Lambda=0.5$,高阶模 PCF 几何结构如图 7 所示,并对其有效折射率曲线进行求解。

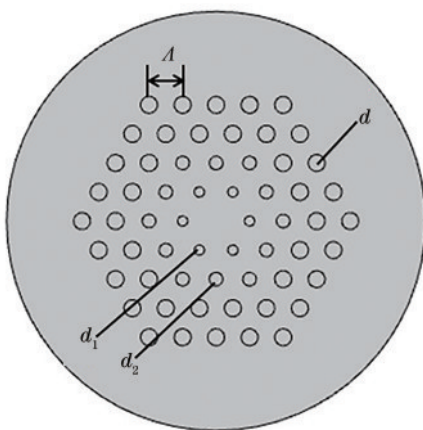


图 7 高阶模 PCF 几何结构

Fig. 7 Schematic diagram of high-order mode PCF structure

图 8 为求解的 LP_{02} 模的有效折射率曲线,为实现 DC-PCF 两纤芯之间的相位匹配,实现能量耦合,同样

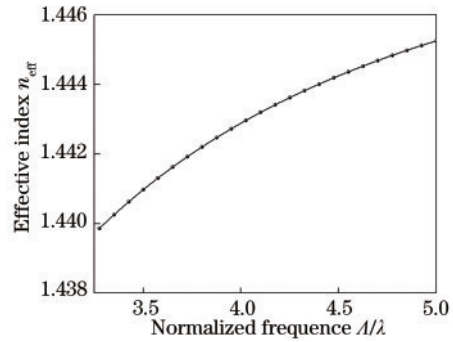


图 8 LP_{02} 模的有效折射率曲线

Fig. 8 Effective refractive index curve of LP_{02} mode

也需要对影响 LP_{02} 模的有效折射率的因素进行探究。

2.2.1 Ring_1 、 Ring_2 空气孔介质柱的直径对 LP_{02} 模的影响

保持 2.2 节中的基本参数不变,分别先后讨论 Ring_1 和 Ring_2 空气孔介质柱的直径对 LP_{02} 模的影响。为了激发出 LP_{02} 模, Ring_1 空气孔介质柱的直径 d_1 取 $d_1/\Lambda=0.25, 0.30, 0.35, 0.45$ 时分别进行 LP_{02} 模的有效折射率曲线求解。

Ring_2 空气孔介质柱的直径 d_2 取 $d_2/\Lambda=0.25, 0.34, 0.40, 0.45$ 时分别进行 LP_{02} 模的有效折射率曲线求解。

由图 9(a)可知,随着 d_1/Λ 逐渐增大, LP_{02} 模的有效折射率值越小,对应的归一化频率取值范围越小。当 $d_1/\Lambda=0.45$ 时, LP_{02} 模完全不能被激发,有效折射率曲线与其他曲线完全不同。

由图 9(b)可知,随着 d_2/Λ 逐渐增大, LP_{02} 模的有效折射率值越小,对应的归一化频率取值范围越大,与 d_1/Λ 对应的归一化频率取值范围变化趋势相反。

2.2.2 Ring_1 、 Ring_2 空气孔介质柱的位置对 LP_{02} 模的影响

保持 2.2 节中的基本参数不变,分别先后讨论 Ring_1 和 Ring_2 空气孔介质柱的位置对 LP_{02} 模的影响。根据 2.1.2 节中定义的偏移方向,设置 Ring_1 空气孔介质柱的偏移量 Δx_1 分别为 $+0.2\Lambda, 0, -0.2\Lambda$,对 LP_{02} 模的有效折射率曲线进行求解,结果如图 10(a)所示。

设置 Ring_2 空气孔介质柱的偏移量 Δx_2 分别为 $+0.2\Lambda, 0, -0.2\Lambda$,对 LP_{02} 模的有效折射率曲线进行求解,结果如图 10(b)所示。

如图 10(a)所示,当 Ring_1 空气孔介质柱沿径向向内偏移 0.2Λ 时, LP_{02} 模有效折射率值增加,对应的归一化频率取值范围减小。当 Ring_1 空气孔介质柱沿径向向外偏移 0.2Λ 时, LP_{02} 模有效折射率值远大于未

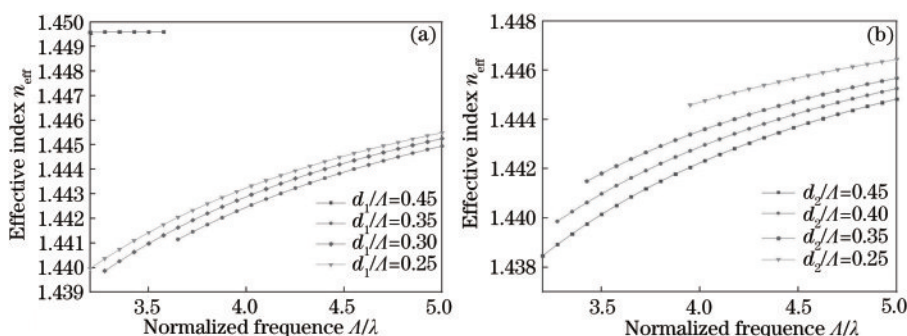


图9 不同 d_1/A 和 d_2/A 的 LP_{02} 模有效折射率曲线。(a) 不同 d_1/A 的 LP_{02} 模有效折射率曲线;(b) 不同 d_2/A 的 LP_{02} 模有效折射率曲线

Fig. 9 Effective refractive index curves of LP_{02} modes with different d_1/A and d_2/A . (a) Effective refractive index curves of LP_{02} modes with different d_1/A ; (b) effective refractive index curves of LP_{02} modes with different d_2/A

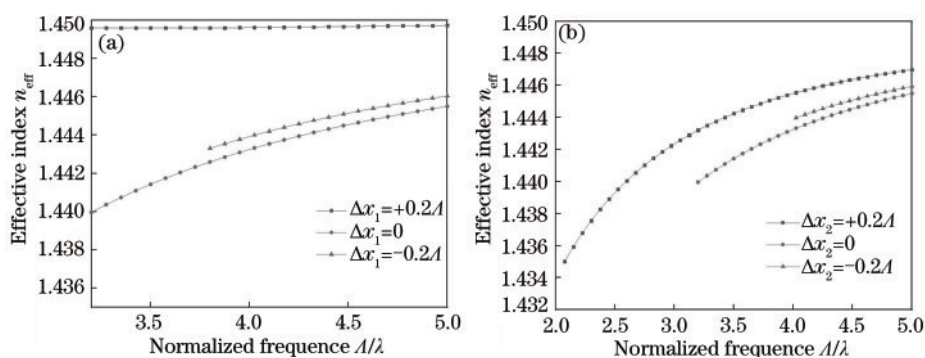


图10 不同 Δx_1 和 Δx_2 的 LP_{02} 模有效折射率曲线。(a) 不同 Δx_1 的 LP_{02} 模有效折射率曲线;(b) 不同 Δx_2 的 LP_{02} 模有效折射率曲线

Fig. 10 Effective refractive index curves of LP_{02} modes with different Δx_1 and Δx_2 . (a) Effective refractive index curves of LP_{02} modes with different Δx_1 ; (b) effective refractive index curves of LP_{02} modes with different Δx_2

偏移和沿径向向内偏移时的值, 曲线趋近于平坦。

如图 10(b) 所示, Ring₂ 空气孔介质柱沿径向向外偏移 0.2A 时 LP_{02} 模有效折射率值最大, 未偏移时 LP_{02} 模有效折射率值最小。

2.2.3 Ring₁、Ring₂ 空气孔介质柱的折射率对 LP_{02} 模的影响

保持 2.2 节中的基本参数不变, 定义 Ring₁ 空气

孔介质柱的折射率 n_1 与背景材料折射率 n_0 的差值为 Δn_1 , 设置 Δn_1 分别为 -0.15、-0.30、-0.45、-0.60、-0.75, 对 LP_{02} 模有效折射率曲线进行求解, 结果如图 11(a) 所示。

定义 Ring₂ 空气孔介质柱的折射率 n_2 与背景材料折射率 n_0 (1.45) 的差值为 Δn_2 , 设置 Δn_2 分别为 -0.15、-0.30、-0.45、-0.60、-0.75, 对 LP_{02} 模

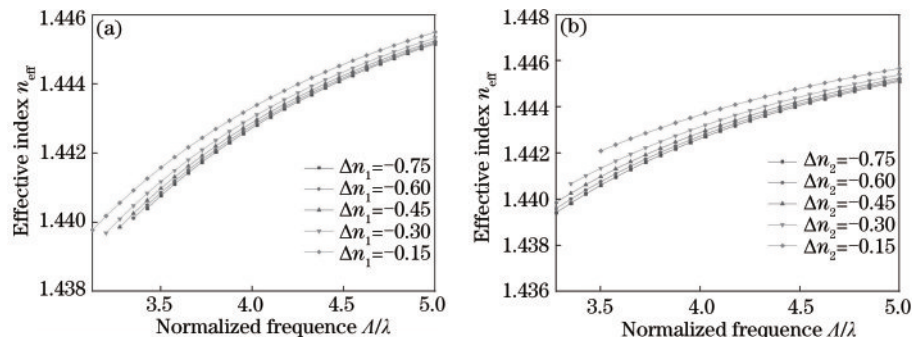


图11 不同 Δn_1 和 Δn_2 的 LP_{02} 模有效折射率曲线。(a) 不同 Δn_1 的 LP_{02} 模有效折射率曲线;(b) 不同 Δn_2 的 LP_{02} 模有效折射率曲线

Fig. 11 Effective refractive index curves of LP_{02} modes with different Δn_1 and Δn_2 . (a) Effective refractive index curves of LP_{02} modes with different Δn_1 ; (b) effective refractive index curves of LP_{02} modes with different Δn_2

有效折射率曲线进行求解,结果如图 11(b)所示。

由图 11(a)表明,随着 Δn_1 增大, LP_{02} 模有效折射率值增大,归一化频率的取值范围增大;由图 11(b)表明,随着 Δn_2 增大, LP_{02} 模有效折射率值增大,归一化频率取值范围减小。因此,通过调整 Ring₁ 和 Ring₂ 空气孔介质柱折射率,可小幅度地调整有效折射率曲线。

3 非对称双芯光子晶体光纤模式转换器的设计

3.1 非对称双芯光子晶体光纤模式转换器结构设计

非对称双芯光子晶体光纤(ADC-PCF)模式转换器的基本结构选择六边形三角晶格排列空气孔介质柱(如图 12 所示)进行设计,晶格周期 Λ 为 $4 \mu\text{m}$,空气孔介质柱直径 d 为 $d/\Lambda=0.5$,基质二氧化硅材料折射率 n_0 为 1.45,空气孔介质柱折射率为 1.00。该器件的基本结构由两个非对称的纤芯结构构成,即左侧的小纤芯结构(由缺失一个空气孔介质柱构成)和右侧的大纤芯结构(缺失一个空气孔介质柱且逐层空气孔介质柱的直径不同)。外层的空气孔介质柱是为了束缚纤芯中的模式。匹配

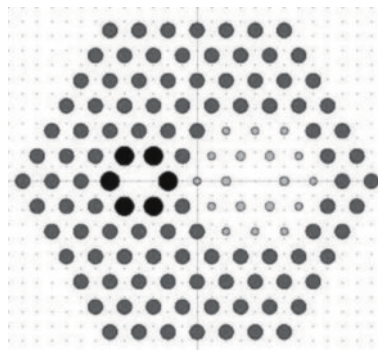


图 12 ADC-PCF 模式转换器基本结构

小纤芯结构与大纤芯结构可传输模式的有效折射率曲线,利用大纤芯结构独特的双模特性激发出高阶模式。为了便于区分,在直径 d_1 右下角加一个角标,小纤芯内包层空气孔介质柱直径 $d_{1,\text{small}}$ 取 $d_{1,\text{small}}/\Lambda=0.5$,根据 2.2 节中包层序数的定义,大纤芯 Ring₁ 层空气孔介质柱的直径 $d_{1,\text{large}}$ 取 $d_{1,\text{large}}/\Lambda=0.3$, Ring₂ 层空气孔介质柱的直径 d_2 取 $d_2/\Lambda=0.4$ 。

计算只存在小纤芯(只考虑 LP_{01} 模)或者只存在大纤芯(只考虑 LP_{02} 模)(如图 13 所示)时光纤的模式有效折射率曲线,结果如图 14 所示。

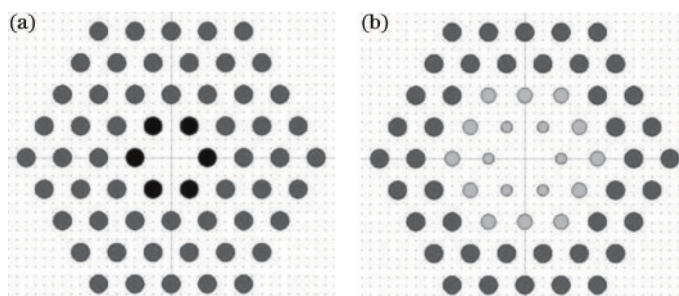


图 13 纤芯结构示意图。(a)小纤芯;(b)大纤芯

Fig. 13 Schematic diagrams of core structure. (a) Small core; (b) large core

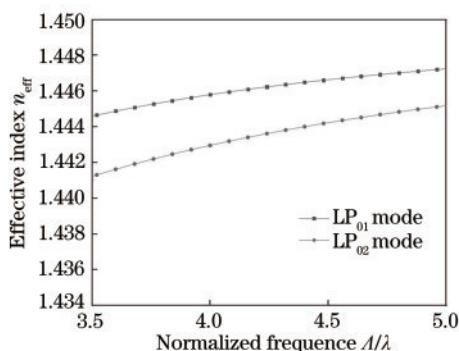


图 14 小纤芯(LP_{01} 模)和大纤芯(LP_{02} 模)的模式有效折射率曲线

Fig. 14 Mode effective refractive index curves of small core (LP_{01} mode) and large core (LP_{02} mode)

当大、小纤芯不发生偏移或者不进行任何掺杂时, LP_{01} 模与 LP_{02} 模的有效折射率相差较大,有效折射率曲线斜率也不同,如图 14 所示。根据前面的分析,可知可以通过基模 PCF 近芯区直径的增大、适度的径向向内偏移以及折射率值的减小来减小 LP_{01} 模有效折射率的值,或者通过 Ring₁ 空气孔介质柱的径向向内偏移、Ring₁ 空气孔介质柱和 Ring₂ 空气孔介质柱折射率值的增加来增大 LP_{02} 模有效折射率的值。在保证激发的目标模式不受影响的前提下,通过调整上述结构参数,可以实现两条模式有效折射率曲线的匹配。

基于此,得到一组优化的结构参数:小纤芯直径修改为 $d_{1,\text{small}}/\Lambda=0.65$ 、折射率与基底材料的折射率的差

值修改为 -0.80 , 大纤芯 Ring₁ 空气孔介质柱直径保持 $d_{1,\text{large}}/\Lambda=0.3$ 不变、Ring₂ 空气孔介质柱直径修改为 $d_2/\Lambda=0.25$, 大纤芯 Ring₂ 空气孔介质柱的折射率与基底

材料的折射率的差值修改为 -0.65 。优化结构参数后, ADC-PCF 模式转换器的结构如图 15 所示, 此时 LP₀₁ 模与 LP₀₂ 模的有效折射率曲线如图 16 所示。

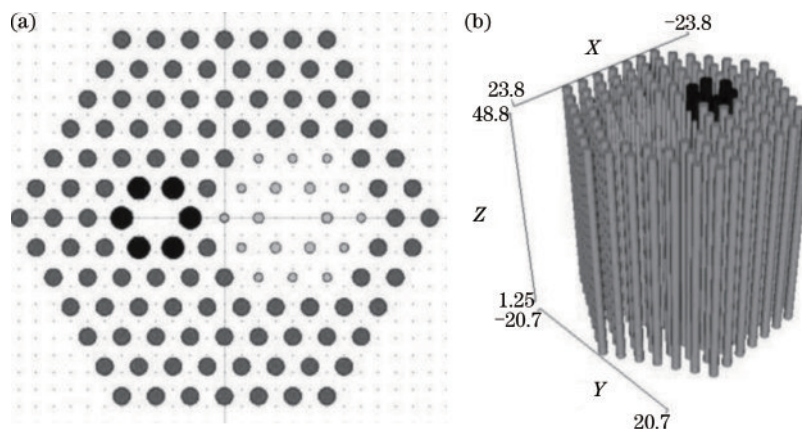


图 15 ADC-PCF 模式转换器优化结构示意图。(a) 二维; (b) 三维

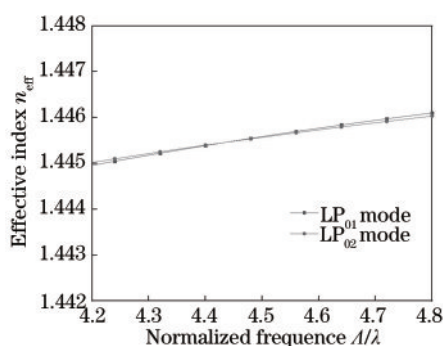


图 16 结构优化后的小纤芯(LP₀₁模)和大纤芯(LP₀₂模)的模式有效折射率曲线

Fig. 16 Mode effective refractive index curves of small core (LP₀₁ mode) and large core (LP₀₂ mode) after structural optimization

由图 16 可知, 优化器件结构后的 LP₀₁ 模和 LP₀₂ 模的有效折射率曲线在较宽的归一化频率范围内可以实现匹配, LP₀₁ 模和 LP₀₂ 模的有效折射率差仅为 3×10^{-4} 左右。

3.2 性能分析

利用光束传播法结合透明边界条件对实现有效折射率曲线匹配的 ADC-PCF 模式转换器结构进行性能分析。在 Rsoft 软件的 BeamPROP 模块中对设计的结构设置监视路径, 在大、小纤芯结构的中心位置分别设置一个空气孔介质柱, 其直径与普通包层空气孔介质柱直径的大小保持一致, 同时将类型设置为非活动波导(该类结构的存在不会影响原有结构的折射率分布, 可以作为监视路径), 标记小纤芯区域的非活动波导为 Region 1, 大纤芯区域的

非活动波导为 Region 2, 如图 17 所示。取光波长 λ 为长距离通信波长 ($1.55 \mu\text{m}$), 将基模模式以文件场的类型输入到 Region 1 中作为初始场(如图 18 所示), 同时对 Region 1 和 Region 2 的场进行监控。

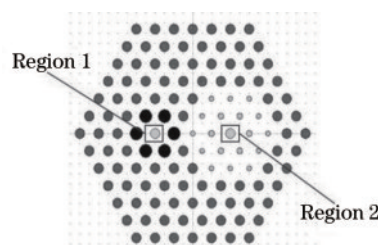


图 17 监视路径设置示意图

Fig. 17 Schematic diagram of monitoring path setting

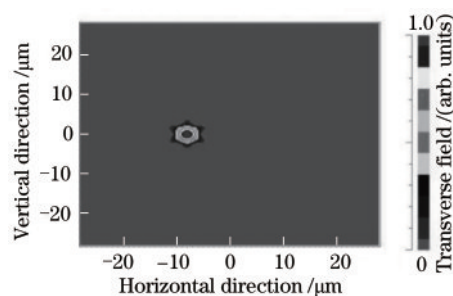


图 18 初始场示意图

Fig. 18 Initial field diagram

利用光束传播法计算得到本文所设计的 ADC-PCF 模式转换器的模式转换方式如图 19 所示, 小纤芯结构处的基模(LP₀₁模)初始场输入后, 模式能量向大纤芯结构处耦合[如图 19(a)所示], 通过大纤芯结构的双模特性激发出高阶模(LP₀₂模)且可以在 ADC-

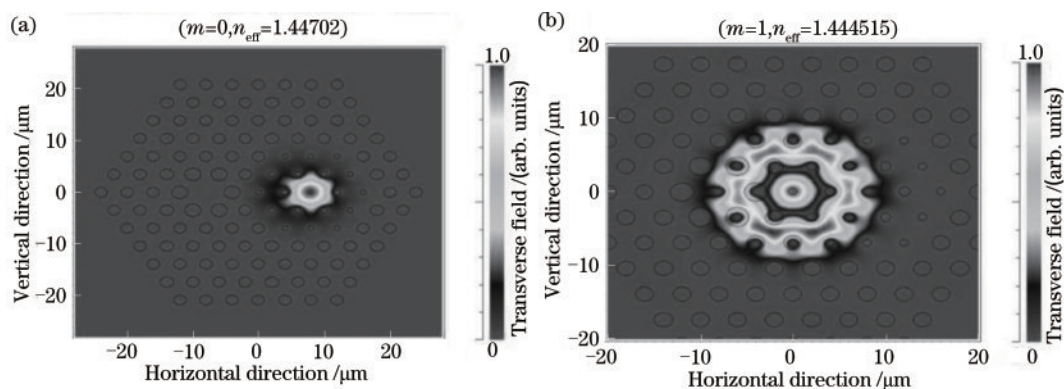


图 19 ADC-PCF 模式转换器的模式转换方式示意图。(a)LP₀₁ 模；(b)LP₀₂ 模

Fig. 19 Schematic diagrams of mode conversion mode of ADC-PCF mode converter. (a) LP₀₁ mode; (b) LP₀₂ mode

PCF 截面中心区域进行传输[如图 19(b)所示]。

同时对 Region 1 和 Region 2 的场能量进行监控,结果如图 20 所示。在本文所设计的 ADC-PCF 模式转换器中,小纤芯结构中的能量在沿 z 方向传播约 800 μm 后逐渐耦合到大纤芯结构中,耦合长度约为 178.5 μm ,耦合效率可达 91.98%。

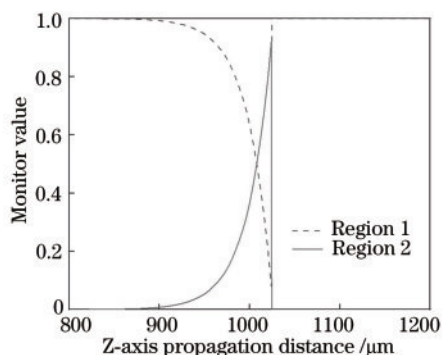


图 20 ADC-PCF 模式转换器的能量耦合曲线

Fig. 20 Energy coupling curves of ADC-PCF mode converter

4 结 论

通过分别调整可传输基模与高阶模的纤芯结构参数,实现模式间的相位匹配,得出优化参数,提出了一种基于空分复用光纤通信系统的模式转换器。实验结果表明:光波长为 1550 nm 时,该器件实现了基模(LP₀₁ 模)与高阶模(LP₀₂ 模)之间的转换,在较宽的归一化频率范围内模式耦合效率可达 91.98%,耦合长度约 178.5 μm ,器件直径最大仅 47.6 μm ,结构设计灵活可控,可减少模式耦合过渡时光纤模式转换器的所需个数,利于集成光学系统,可为突破单纤传输容量极限、破解光传输网络带宽危机提供有效途径。

参 考 文 献

- [1] Cheng L, Liao L, Luo X, et al. Design of multi-core photonic crystal fiber for space-division multiplexing [C] //International Photonics and Optoelectronics Meetings, June 18-21, 2014, Wuhan, China. Washington, D.C.: OSA, 2014: FF4B.8.
- [2] Sillard P. Few-mode fibers for space division multiplexing [C] //Optical Fiber Communication Conference, March 20-22, 2016, Anaheim, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: Th1J.1.
- [3] Li S, Wang J. A compact trench-assisted multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for ultrahigh-density space-division multiplexing (19 rings \times 22 modes)[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 3853.
- [4] Xia C, Correa R A, Bai N, et al. Low-crosstalk few-mode multi-core fiber for high-mode-density space-division multiplexing[C] //European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 16-20, 2012, Amsterdam. Washington, D. C.: OSA, 2012: Mo.1.F.5.
- [5] von Huene J H, Ryf R, Winzer P, et al. LCoS-based mode shaper for few-mode fiber[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 18097-18110.
- [6] Feng Y H, Luo J W, Li Y R, et al. Mode multiplexing and high efficient switching in few-mode fiber based on modeled blazed grating[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1-7.
- [7] Melati D, Alippi A, Melloni A, et al. Integrated spatial division (de)multiplexer for few-mode fiber transmission[C] //18th Italian National Conference on Photonic Technologies (Fotonica 2016), June 6-8, 2016, Rome. London: IET, 2016: 1-3.
- [8] Dai D X, Mao M. Mode converter based on an inverse taper for multimode silicon nanophotonic

- integrated circuits[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28376-28388.
- [9] Huang Q D, Wu Y F, Jin W, et al. Mode multiplexer with cascaded vertical asymmetric waveguide directional couplers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(14): 2903-2911.
- [10] Ismael 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.
- [11] Li J, Liu J T, Hu H F, et al. Tunable orbital angular momentum mode conversion in asymmetric long period fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(23): 2103-2106.
- [12] Zhao Y H, Liu Y Q, Zhang C Y, et al. All-fiber mode converter based on long-period fiber gratings written in few-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4708-4711.
- [13] Xue Y R, Tian P F, Jin W, et al. Superimposed long period gratings based mode converter in few-mode fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(5): 054204.
薛艳茹, 田朋飞, 金娃, 等. 基于少模长周期光纤叠栅的模式转换器[J]. *物理学报*, 2019, 68(5): 054204.
- [14] Jung Y, Alam S U, Richardson D J, et al. Compact higher-order mode converter based on all-fiber phase plate segment[C] // 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 27-October 1, 2015, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [15] Yin G L, Wang C L, Zhao Y H, et al. Multi-channel mode converter based on a modal interferometer in a two-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3757-3760.
- [16] Gavrilov A V, Pavelyev V S. Integrated fiber-based transverse mode converter[J]. *Computer Optics*, 2017, 41(4): 510-514.
- [17] Zhao Y H, Liu Y Q, Zhang L, et al. Mode converter based on the long-period fiber gratings written in the two-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6186-6195.
- [18] Zhang X H, Liu Y G, Wang Z, et al. LP_{01} - LP_{11a} mode converters based on long-period fiber gratings in a two-mode polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7013-7021.
- [19] Xiao G L, Zhang K F, Yang H Y, et al. Refractive index sensor with double resonance peaks for D-type symmetric two-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1206001.
肖功利, 张开富, 杨宏艳, 等. D型对称双芯光子晶体光纤双谐振峰折射率传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1206001.
- [20] Yu C L, Wang M, Feng S Y, et al. Research progress on ytterbium-doped large mode area photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170602.
于春雷, 王孟, 冯素雅, 等. 掺镱大模场光子晶体光纤的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170602.
- [21] Liu H, Bai B B, Zhang Y Z, et al. High-sensitivity temperature measurement based on SPR in gold-PDMS-coated photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0404003.
刘海, 白冰冰, 张砚曾, 等. 基于SPR效应的金-PDMS涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0404003.