

模分复用系统中的少模光纤研究新进展

王 潇¹ 郑宏军¹ 黎 昕¹ 刘 阳¹ 于如愿¹ 白成林¹ 胡卫生²

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城, 252059; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要 近年来,在模分复用(MDM)光通信领域中采用少模光纤(FMF)来增加传输容量的方法已经得到高度关注和深入研究,该方法可以突破单模光纤(SMF)非线性香农极限.结合本课题组开展的模分复用方面的部分工作,比较系统、深入地分析讨论了模分复用研究过程中相对突出、经典的部分研究工作和最新进展,涉及少模光纤结构设计、特性及应用.分析讨论了折射率阶跃分布和折射率渐变分布单芯少模光纤、用于无 MIMO 数据传输的椭圆芯少模光纤、用于光学参量放大的椭圆芯少模光纤、由中心圆孔和椭圆环芯组成的保偏少模光纤、具有 10 种保偏模式的 PANDA 环芯光纤、用于模分复用传输的低损耗少模环形光纤以及超模光纤的结构设计、特性及应用.最后,给出了本课题组近期提出的新颖的三环芯 FMF 以及 FMF 研究发展趋势,为模分复用光纤前传等系统应用提供有效支持.今后的较长一段时间,少模光纤研究中的采用特殊材料和光纤结构设计来实现大有效折射率差、低衰减、低色散、大有效模场面积和低非线性系数等指标仍然是通信领域需要继续探索的研究热点.

关键词 模分复用;少模光纤;椭圆芯 FMF;环形芯 FMF;超模 FMF

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

0 引言

近年来,云计算、大数据和流媒体等所引发的各种业务流量爆炸式增长,世界各个国家相继制定了国家宽带战略,单模光纤通信容限面临趋近香农极限的限制,光纤通信发展迎来了前所未有的机遇和挑战^[1-3].光纤通信业界围绕时分复用、波分(频率)复用、偏振复用、正交幅度调制、空分复用(包括模分复用、芯式复用和轨道角动量复用)五个物理维度对通信网络的传输速率、传输容量进行了不同程度的突破,其中,最近提出的模分复用是突破通信挑战的最佳物理维度之一^[3-5].

在模分复用方面,通常利用光纤每个模式间的正交性,将每个模式作为独立的信道,形成多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)通道,提高系统传输容量,其研究主要集中在基于少模光纤(few mode fiber, FMF)、少模多芯光纤和超模光纤的模分复用研究,并且与长距离相干光纤通信相结合,以显著提高通信容量^[3,5,6].目前,模分复用研究由美国、日本和部分欧洲国家主导^[3,5,6].在中国,2014 年国家科技部资助了天津大学牵头的“多维复用光纤通信基础研究”973 基础研究项目^[3,6].天津大学、清华大学、北京大学、北京邮电大学、中国科学院半导体研究所、武汉邮电科学研究院、华中科技大学、北京交通大学先后加入模分复用领域的研究工作.总之,模分复用领域处于基础研究阶段,是新一代通信系统的研究热点^[5-25].本文主要讨论用于模分复用传输的少模光纤的经典、突出的工作及最新研究进展工作,涉及折射率阶跃分布和折射率渐变分布单芯少模光纤、用于无 MIMO 数据传输的椭圆芯少模光纤、用于光学参量放大的椭圆芯少模光纤、由中心圆孔和椭圆环芯组成的保偏少模光纤、具有 10 种保偏模式的 PANDA 环芯光纤、用于模分复用传输的低损耗少模环形光纤以及超模光纤的结构设计、特性及应用,并给出了本课题组近期提出的新颖的三环芯 FMF 以及 FMF 研究发展趋势.

收稿日期:2018-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(61671227,61431009);山东省自然科学基金项目(ZR2011FM015);“泰山学者”建设工程专项经费等资助

通讯作者:郑宏军,男,汉族,博士,教授,研究方向:光通信,E-mail:hjzheng@yahoo.com.

1 折射率阶跃分布单芯少模光纤

折射率阶跃分布光纤技术最为成熟,该类型光纤是应用最为广泛的光纤.图1是一种6-LP模式单芯少模光纤的折射率阶跃分布示意图^[9].图中可见,6-LP模式光纤的纤芯折射率与标准多模光纤的纤芯中心折射率一致,远大于标准单模光纤的纤芯折射率.6-LP模式光纤的纤芯半径稍大于标准单模光纤的纤芯半径,远小于标准多模光纤的纤芯半径,光纤归一化频率为

$$V = (2\pi a / \lambda) \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1)$$

n_1 是纤芯折射率, n_2 是光纤包层折射率, a 是纤芯基础半径, λ 是入射光波长.当 $V = 2.405$ 时,光纤中出现对应的线性偏振模基模 LP_{01} (即对应单模情况),在相同入射波长情况下,随着光纤直径和折射率的增加,当 $2.405 < V < 3.8$ 时,光纤中出现对应的线性偏振模基模 LP_{01} 、高阶模 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{02} 、 LP_{31} 、 LP_{12} ;这些模式都具有偏振简并,高阶模式有些还具有空间简并如 LP_{11} 的空间简并模式为 LP_{11a} 和 LP_{11b} ,它们折射率近似相同,称简并模式.

该光纤的所有六个模式的有效折射率与包层折射率差在 $2.43e-3$ 以上,弯曲损耗远小于 1 dB/turn ,不同模式之间的有效折射率差量级为 $1e-3$ (LP_{21} 与 LP_{02} 有效折射率差 $1.02e-3$),各个模式的有效模场面积量级为 $100 \mu\text{m}^2$,各个模式与基模之间的差分模式群时延 DMGD 量级为 1 ns/km ,除模式 LP_{12} 外的各个模式的色散为 $20\text{--}30 \text{ ps/nm/km}$ (模式 LP_{12} 的色散为 -9.6 ps/nm/km).

2 折射率渐变分布单芯少模光纤

折射率渐变分布光纤具有低模式群时延、其中光波电场的近场和远程具有一致性,得到了广泛应用,图2所示是一种6-LP模式单芯少模光纤的折射率渐变分布示意图^[9].可见,6-LP模式渐变光纤的纤芯折射率在标准多模光纤的纤芯中心折射率和标准单模光纤的纤芯折射率之间;纤芯中心到包层的折射率呈渐变型分布,折射率按照方程^[8]设置

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \cdot [1 - 2\Delta(r/a)]^{\frac{1}{2}}, & r \leq a, \\ n_2, & r > a, \end{cases} \quad (2)$$

式中 n_1 表示纤芯中心折射率, n_2 表示包层折射率, r 表示光纤中任意一点到轴心的距离, $a = 14 \mu\text{m}$ 是光纤纤芯外径, $\alpha = 1.95$, $n_1 - n_2 = 10e-3$, $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2) \approx (n_1 - n_2) / n_1$; $V = 9.65$ (1550 nm).为了减小弯曲损耗,该光纤纤芯外部加了一个折射率下陷层,6-LP模式渐变光纤的纤芯半径大于标准单模光纤的纤芯半径,小于标准多模光纤的纤芯半径.光纤的所有六个模式的有效折射率与包层折射率差在 $1.46e-3$ 以上,弯曲损耗远小于 1 dB/turn ,各个模式与基模之间的差分模式群时延 DMGD 量级为 $-6 \text{--}8 \text{ ps/km}$ (模式 LP_{31} 的 DMGD 是 0.8 ps/km),各个模式的有效模场面积量级为 $100\text{--}300 \mu\text{m}^2$,各个模式的色散近似为 20 ps/nm/km .

3 椭圆芯少模光纤

3.1 用于无 MIMO 数据传输的椭圆芯少模光纤

文献^[10]提出了一种椭圆芯少模光纤(e-FMF),其主要的研究思路如下:常规的圆形芯 FMF(c-FMF)需要复杂的多输入多输出(MIMO)数字信号处理(DSP)进行相干检测以减轻在 c-FMF 中产生的模式耦合.与传统时域均衡相比,频域均衡能够部分缓解 DSP 的计算复杂度(CC),但 DSP 的 CC 仍然受到差模群时延(DMGD)和 FMF 中产生的大数目耦合模式的影响. FMF 的几种设计策略,包括具有超低 DMGD 的 FMF、具有 DMGD 补偿的 FMF 链路,以及具有强模式耦合的 FMF 以减少整个信道脉冲响应的扩展,另一种降低 DSP 复杂度的策略是使用部分 MIMO.对于具有阶跃折射率分布的 c-FMF, LP_{01} 和 LP_{11} 模式间隔大因而具

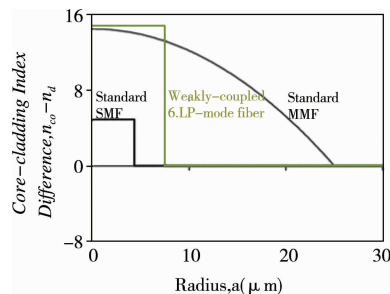


图1 一种6-LP模式单芯少模光纤的折射率阶跃分布示意图

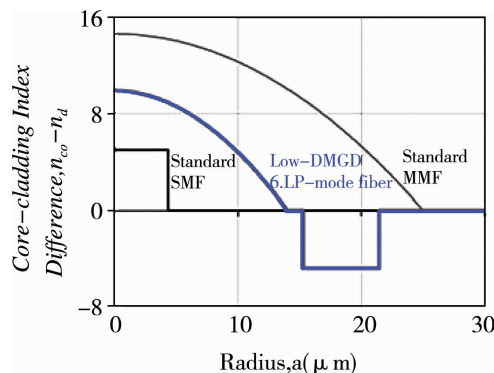


图2 一种6-LP模式单芯少模光纤的折射率渐变分布示意图

有低串扰。然而,解决 LP_{11} 空间简并模式串扰仍然是相当具有挑战性的。基于椭圆芯 FMF(e-FMF)的 MDM 传输可以进一步减轻 LP_{11a} 和 LP_{11b} 之间的模式耦合,椭圆芯光纤在 20 世纪 80 年代受到广泛关注,可应用于包括偏振光纤(PMF)、声光移频器、模式耦合器和空间模式滤波器。这些应用促进了椭圆芯光纤的综合理论和实验研究,近年来,三种空间模式(LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b})在 $1.3 \mu\text{m}$ 波段和 $1.5 \mu\text{m}$ 波段的 LP_{01} 、 LP_{11a} 两种模式都可以成功地在渐变折射率 e-FMF 上传输。然而,用传统的纤维制造设备很难制造出芯和包层之间具有高折射率差异的椭圆环芯光纤。文献[10]提出一种 e-FMF,它可以支持具有增强模式间隔的特定模式数目,以配合商业模式选择性激励技术,例如三端口光子灯笼(PL)。在这个工作中,首先设计一个与 e-FMF 具有相同模式数的传统 c-FMF 作为参考,然后进行优化和制造在 1550 nm 的特定模式数的 e-FMF。

为了说明设计策略,选择了三种模式 e-FMF 作为例子。椭圆芯的确定要求芯水平半径 a ,芯垂直半径 b 和椭圆率中的至少两个参数。当椭圆度固定时,由于水平半径和垂直半径的几种可能组合,e-FMF 可以支持不同数量的空间模式。使用归一化频率来确定用于引导三种空间模式的 c-FMF 的纤芯尺寸,然后,将椭圆芯的水平半径设为与 c-FMF 的纤芯尺寸相同,采用阶跃折射率: $n_{\text{core}} = 1.449$ 、 $n_{\text{cladding}} = 1.444$ 、 $a = 8.15 \mu\text{m}$,选择 $a = 8.15 \mu\text{m}$ 是因为相同折射率分布的 c-FMF 可以在 C 波段上支持三种空间模式(LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b})。通过从 $0.2 \mu\text{m}$ 的步长扫描 $0-16 \mu\text{m}$ 的垂直半径 b ,使用有限元模式求解器(COMSOL)来获得模数和相应的有效折射率的变化。图 3 给出了椭圆芯的示意图和相对于垂直半径 b 的模式数的变化。如果 b 非常小,光场的波导限制变得非常弱,甚至基模也不能引导传输。当 $0.8 \mu\text{m} < b < 2 \mu\text{m}$,椭圆芯光纤在单模区工作。当 $2 \mu\text{m} < b < 4.5 \mu\text{m}$ 时,只有两种空间模式(LP_{01} 和 LP_{11a})被引导,而 LP_{11b} 模式被截止。当 $4.5 \mu\text{m} < b < 8.15 \mu\text{m}$ 时,FMF 可以在精确的三模式区域操作。如果 b 再从 $8.15 \mu\text{m}$ 增加到 $12 \mu\text{m}$ 时,则会出现 LP_{21b} 和 LP_{21a} 高阶模式,并且 e-FMF 变成五模式。

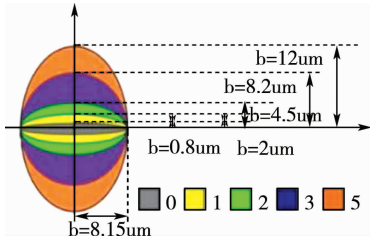


图 3 椭圆芯的示意图和相对于垂直半径 b 的模式数变化

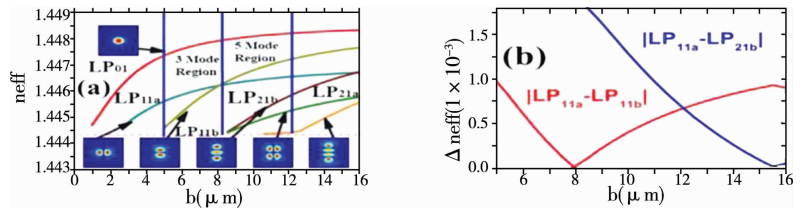


图 4 椭圆芯光纤的有效折射率(a)和模式间隔(b)随 b 的变化

图 4 椭圆芯光纤的有效折射率(a)和模式间隔(b)随 b 的变化。如图 4(a)所示,由于 e-FMF 涉及的模式与传统的 c-FMF 相似,因此使用符号 LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 和 LP_{21a} 。请注意,在传统 c-FMF 中 LP_{21b} 模式轮廓收缩成具有 e-FMF 三个波瓣的轮廓,为了便于比较,仍然使用 LP_{21b} 的符号来表示与传统 c-FMF 的对应关系。图 4(b)给出了作为 b 的函数的 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式之间的有效折射率差。当 $a = b$ 时,e-FMF 成为传统的 c-FMF, LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式具有相同的有效折射率。基于这些情况,e-FMF 具有两个要优化的操作区域,其可以分别定义为三模式操作区域和五模式操作区域。在三模优化区域中,较小的 b 值有助于增强 LP_{11a} 和 LP_{11b} 之间的模式间距。然而,较小 b 可能带来较大弯曲损耗问题,这将在后面的讨论中阐述。这样,弯曲损耗限制了 LP_{11a} 和 LP_{11b} 在三模式优化区域之间的最大模式间距,同时,在五模优化区域,较大的 b 值有助于增加 LP_{11a} 和 LP_{11b} 之间的模式间距。然而, LP_{11a} 和 LP_{21b} 之间的模式间隔会大大减小,当 $b = 12 \mu\text{m}$ 时, LP_{11a} 和 LP_{11b} 之间的模式间隔(有效折射率差)等于 LP_{11a} 和 LP_{21b} 之间的模式间隔。因此,在五模式工作区域的 b 的最佳值约为 $12 \mu\text{m}$ 。尽管在五模式操作区域内 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式之间的串扰模式可以通过 b 值的适当选择得到很好的管理,但是在三模分复用期间可能发生高阶模式(如 LP_{21b} 和 LP_{21a})的附加串扰。

为了设计一个支持三种空间模式的 e-FMF,还研究了 e-FMF 的弯曲损耗。与 C-FMF 不同,e-FMF 的弯曲损耗不仅由曲率半径(R)决定,而且由弯曲角度决定,弯曲角度被定义为椭圆芯的取向与曲率半径之间的夹角。研究表明, b 的最佳值是无沟槽结构约 $6.5 \mu\text{m}$,以保证模式间隔为 5×10^{-4} 。理论上,当阶跃折射率差为 0.5% 时,e-FMF 三模式区域的优化设计约为 $a = 8.15 \mu\text{m}$ 和 $b = 6.5 \mu\text{m}$ 。

在三模区域上制作了 e-FMF。采用等离子体化学气相沉积(PCVD)方法成功地制备了圆形纤维预制件,

最后,获得 7.94 km 椭圆芯三模光纤并表征.

图 5 是 e-FMF 特性表征实验设置. 采用 1550 nm 分布反馈(DFB)激光器作为光源;同时,利用偏振控制器(PC)对输入光的偏振进行适当的设置后,采用全光纤 PL(凤凰光电, 3PL0160153)进行模式选择转换,然后,采用保偏光纤(PMF)熔接机(Fujikura FSM100P+)把输出为 c-FMF(OFS 双模式

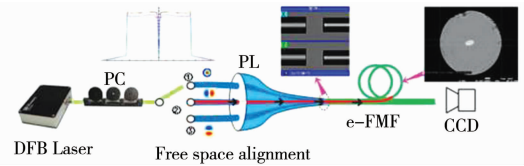


图 5 是 e-FMF 特性表征实验设置

GI)的 PL 自由空间耦合到所制造的 e-FMF. 在单独地连接 DFB 激光器与 PL 的单个 SSMF 之后,通过 CCD 相机来可视化经 e-FMF 传输后的输出模式轮廓. 所制备的 e-FMF 经扫描电子显微镜(SEM)显示 e-FMF 的包层直径为 $120 \mu\text{m}$, 而纤芯的形状保持椭圆形, $a=8 \mu\text{m}$ 和 $b=6.2 \mu\text{m}$. 其次,采用光纤损耗截断法测得在 1550 nm 处,所制造的 e-FMF 的 LP_{01} 和 LP_{11a} 模式传播损耗分别为约 0.224 dB/km 和 0.229 dB/km. 然而,当 LP_{11a} 模式经 PMF 熔接机耦合最佳时, LP_{11b} 模式耦合效率低;从而导致 LP_{11b} 模式传播损耗随时间而变, LP_{11b} 模式的平均损耗约为 0.29 dB/km. 然后,比较了 300 m e-FMF 输出与 PL 输出的模式图,基本模式图清晰地从圆形到椭圆形变化. 同时,利用重叠积分对模式串扰进行了分析研究. 在 300 m e-FMF 传输后,计算出的 LP_{11a} - LP_{11b} 、 LP_{01} - LP_{11a} 和 LP_{01} - LP_{11b} 的模式串扰值分别为 -30.46 dB 、 -33.96 dB 和 -32.92 dB . 这些任意模式对之间的串扰值非常小,表明三种空间模式之间具有良好的正交性.

采用输矩阵法研究在 2 km e-FMF 的传输情况. 研究表明 e-FMF 三种空间模式之间没有明显的模式耦合,优于相同情况下的 c-FMF. 环境扰动情况下,在 2 km c-FMF 中传输后的 LP_{11} 模式图成为环状,表明 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式之间存在严重模式耦合. 然而,即使在强扰动下,能够观察到 2 km e-FMF 中传输后的 LP_{11a} 和 LP_{11b} 存在清晰的模式分布图,它们间的模式耦合弱. 基于重叠积分的方法,可以识别出 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式之间的串扰是 22.44 dB.

研究表明,C 波段上的 LP_{11a} 和 LP_{11b} 之间的模式间隔约为 9×10^{-4} ,表明它们可以作为模分复用传输的独立模式信道. 计算出的三种空间模式在 C 波段上的群速度色散(GVDS)在 $10\text{-}24 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 范围内,与标准单模光纤 SSMF 色散值 $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 相当. 尤其是高阶模式与基本模式相比具有小的 GVD.

文献[10]提出了一种椭圆芯少模光纤(e-FMF),它支持 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 三种空间模式,增强了 LP_{11a} 和 LP_{11b} 间的模式间隔以抑制模分复用(MDM)传输期间的模式耦合;在三模式操作的情况下,模式间隔和弯曲损耗之间存在折中均衡. 最后,基于商用纤维制造设备研制了 7.94 km e-FMF;在 1550 nm 处的三个空间模式的 e-FMF 传输损耗小于 $0.3 \text{ dB}/\text{km}$;当 2 km e-FMF 受到应力引起的强扰动时, LP_{11a} 和 LP_{11b} 之间的串扰为 -22.44 dB .

3.2 用于光学参量放大的椭圆芯少模光纤的设计

文献[11]提出了一种色散优化的椭圆芯少模光纤,用于 C 波段的宽带参量放大,光纤不对称结构有利于消除传输系统中的串扰和参数增益的降低.

图 6 为一种三个线性偏振 3-LP 模 (LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{02}) 椭圆芯少模光纤的横截面图^[11],可以看出光纤由纤芯(CO)、内包层(IC)、折射率凹陷层(TR)和外包层四部分组成,椭圆芯少模光纤的长半轴用 x 表示,短半轴用 y 表示,芯短半轴半径 $R_{\text{CO}-y} = 1.57 \mu\text{m}$,内包层短半轴半径 $R_{\text{IC}-y} = 4.6 \mu\text{m}$,凹陷折射率层短半轴半径 $R_{\text{TR}-y} = 6.28 \mu\text{m}$,椭圆率 $x/y = 1.46$,大的椭圆率值可以确保较大的有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} \geq 10^{-3}$,芯折射率 $n_{\text{CO}} = 1.468$,内包层折射率 $n_{\text{IC}} = 1.4534$,凹陷折射率层折射率 $n_{\text{TR}} = 1.442$,外包层为纯二氧化硅,外包层折射率 $n_{\text{Cladding}} = 1.444$.

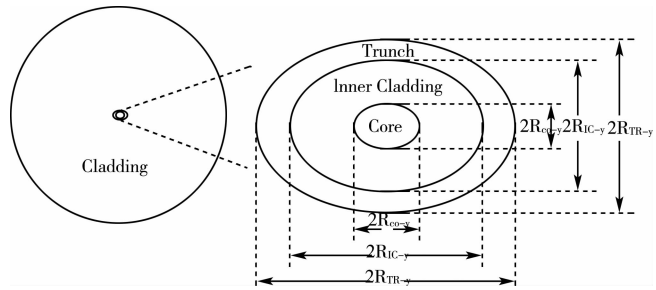


图 6 一种 3-LP 模椭圆芯少模光纤横截面分布^[11]

图 7 为 3-LP 模椭圆芯少模光纤的色散随波长的变化图^[11],如图所示, LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 随着波长的增加而增加, LP_{02} 随着波长的增加而减小, LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 和 LP_{02} 的零色散波长分别为 1545.5, 1545.6, 1545.7, 1545.9 nm, 其色散斜率分别是 $0.0711, 0.1148, 0.043, -0.1504 \text{ ps}/\text{nm}^2/\text{km}$;三种线性偏振模式的零色散波长均在 C 波段范围内. 3-LP 模椭圆芯少模光纤不仅可以应用于椭圆芯少模光纤传输系统的放大器,也可应用于独立参量放大器的设计中. 由于椭圆芯少模光纤的纤芯面积小, LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 和 LP_{02} 模

拥有较小的模场面积和较大的非线性系数,有益于增加参量增益,其有效模场面积分别为 25、67、72、90 m^2 ,对应的非线性系数为 4.22、1.57、1.46、1.17 km/W .

4 椭环形芯少模光纤

文献[12]提出了一种圆形空气孔辅助的椭环形芯的 FMF 结构,该结构赋予了一种新的自由度来调节所有导模的双折射,包括基本偏振模.少模光纤(FMF)由于其巨大的传输容量能力和与传统 SMF 的低损耗连接成为 SDM 的一种重要实现途径.传播模式之间的串扰被认为是 FMF 数据链路中最关键的问题.为了解决这个问题,已经提出了两种不同的方法.一种是在接收机上使用多输入多输出(MIMO)数字信号处理系统(DSP),以电子方式恢复在引导模式下携带的信号.该技术的缺点是 MIMO 的复杂度随着模式数目的非线性增大,容易耗尽 DSP 容量和功耗.另一种方法是使用特殊设计的 FMF,使相邻传播模式之间的有效折射率 Δn_{eff} 之间存在较大差异,以从根本上抑制模式耦合.实验表明,当 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$ 时,可以有效地抑制串扰^[13,14].后一种方法在能量效率方面具有明显的优势,特别适合于数据中心 DC 中的短距离传输.这是该小节设计灵活、可扩展性与高 Δn_{eff} 导模的 FMF 的研究动机^[12].

椭圆芯光纤(ECFS)已广泛应用于保偏光纤(PMF),在导模中提供了一种有效的形式双折射.在 ECF 中,通过增加芯层与包层之间的折射率对比,可以使相邻 LP 模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 变大.近年来,已经报道了将 ECF 作为模分复用(MDM)中的传输介质的尝试,以提高系统容量和频谱效率,通常在引导模式的数目与可实现的有效折射率差之间存在折中权衡,引导模式的数目较多时,仍然存在极化模式简并^[15,16].文献[12]提出了 10 模式和 14 模式的 PM-FMF,实现了无偏振简并,在整个 C+L 波段模式间的最小折射率差大于 1.2×10^{-4} .

所提出的 10 模式 PM-FMF 的横截面如图 8 所示^[12],其中心包括一个圆形气孔,一个圆周的椭圆环芯和一个圆形包层.背景材料是纯二氧化硅,环芯是掺杂 GeO_2 的二氧化硅, d_{cladding} 表示包层直径, r 表示气孔半径.沿 x 和 y 轴的 a 的外半径分别是 b_x 和 b_y ,并且椭圆环的内半径是 a_x 和 a_y , $\eta = b_x/b_y = a_x/a_y$ 表示椭圆度. $\rho = a_x/b_x = a_y/b_y$.除了气孔半径 r 外,光纤的所有其他参数设置为与 8 模式 PM-FMF 相同, $n_{\text{ring}} = 1.474$, $n_{\text{cladding}} = 1.444$, $d_{\text{cladding}} = 125 \mu\text{m}$, $\eta = 1.4$, $\rho = 0.67$, $b_x = 5.06 \mu\text{m}$.

通过初步模拟仿真,首先注意到,引导模式的数量随着气孔尺寸的增加而减小.原因可能是气孔略微损害了环形纤芯的有效折射率,因此导致一些高阶矢量模式容易泄漏.为了将光纤所支持的矢量模式的数量保持为 10,应该增加环和包层之间的环宽度或折射率差.在这里,选择将 GeO_2 掺杂率从 20.95% 提高到 23.75%,可实现椭圆环芯折射率 1.474-1.478.

研究了所有相邻导模之间的 Δn_{eff} 与气孔半径 r 的关系,波长为 1550 nm, $n_{\text{ring}} = 1.475$, $n_{\text{cladding}} = 1.444$, $d_{\text{cladding}} = 125 \mu\text{m}$, $\eta = 1.4$, $\rho = 0.67$, $b_x = 5.06 \mu\text{m}$.此时, $a_y = 2.42 \mu\text{m}$.气孔半径 r 在 1.5-1.84 μm 的范围内,则所有导模中的最小 Δn_{eff} 可以大于 10^{-4} ,这表明它对气孔尺寸的稳健性.特别是当 $r = 1.7 \mu\text{m}$,最小 Δn_{eff} 可以达到 1.37×10^{-4} 的最高值;其 1.55 μm 处的矢量模式的横向电场如图 9 所示.因此,通过在光纤中心添加适当尺寸的圆形气孔的方法可以完全分离 10 个导模.

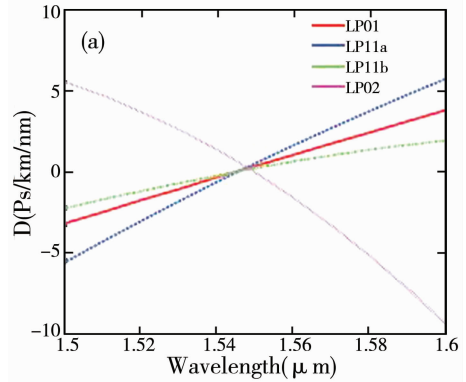


图 7 一种 3-LP 模椭圆芯少模光纤的色散随波长的变化^[11]

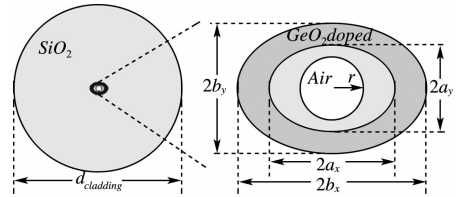


图 8 所提出的椭圆环芯纤维的横截面

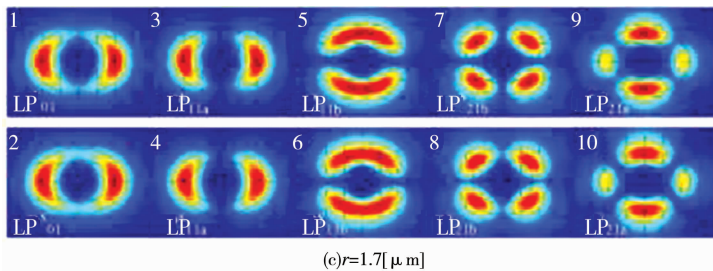


图 9 在 1.55 μm 处的矢量模式的横向电场, $r = 1.7 \mu\text{m}$ ^[12]

当气孔半径 r 固定在 $1.7 \mu\text{m}$ 时,还研究了设计光纤在整个 C+L 带上的模态波长依赖性. 计算 10 种导模的有效折射率和色散与波长的关系如图 10(a)(b)所示^[12]. 在模拟仿真中,通过使用椭圆环芯和包层的混合 Sellmeier 方程,精确计算导模的有效折射率,材料色散效应. 所有导模的最大色散在 C+L 波段约为 -60 ps/km/nm ,表明当应用短距离光互连时,模态色散可以忽略不计. 所有相邻导模之间的最小 Δn_{eff} 在整个 C+L 波段为 1.32×10^{-4} ,如图 10(c)所示.

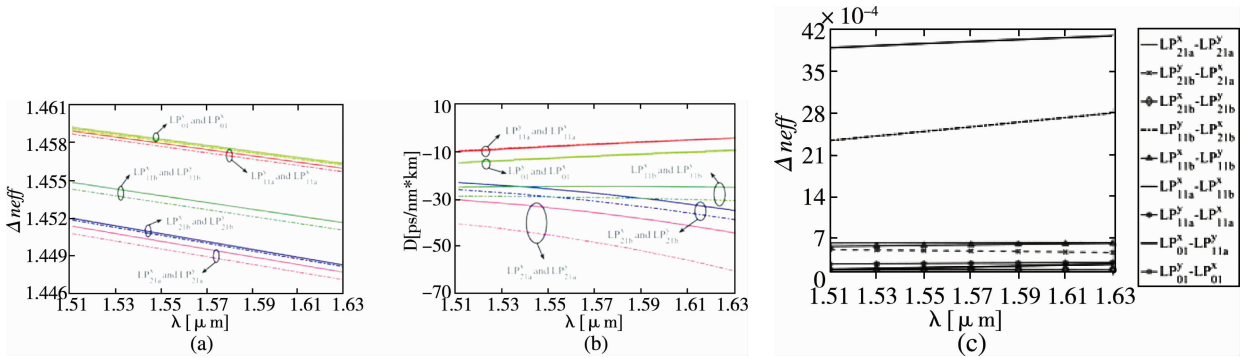


图 10 a)所有导模的有效折射率;(b)所有导模的色散;(c)对于 10 模式 PMF,所有相邻导模之间的与 λ 波长的关系,

$$r = 1.7 \mu\text{m}, = 1.478, = 1.444, = 125 \mu\text{m}, \eta = 1.4, \rho = 0.67, \text{ 并且 } = 5.06 \mu\text{m}$$

此外,通过增加椭圆环宽度(这里,只将参数 bx 从 $5.06 \mu\text{m}$ 增加到 $5.46 \mu\text{m}$,并且所有其他参数与 10 模式 FMF 的参数相同)并引入尺寸在 1.7 至 $1.88 \mu\text{m}$ 气孔的情况下,可以获得 14 模式 PMF,选择气孔尺寸 $r = 1.8 \mu\text{m}$ 作为最终设计. 图 11 是 14 模式 PMF 的所有导模的横向电场^[12],计算研究了 14 种导模的有效折射率、色散与波长的函数关系^[12];所有导模的最大色散在 C 波段约为 -70 ps/km/nm ,所有相邻导模之间的 Δn_{eff} 在整个 C+L 波段上可以大于 1.2×10^{-4} . 因此,该提出的方法对于具有更多模式的 PMF 的设计是非常有前途的,从而实现密集的 SDM 传输.

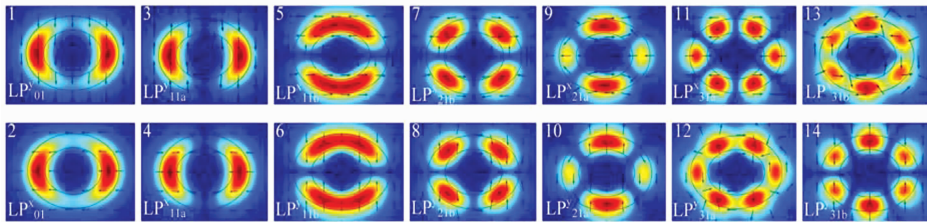


图 11 最佳气孔半径 $r = 1.8 \mu\text{m}$,在 $1.55 \mu\text{m}$ 处矢量模式横向电场的幅度和方向

5 环形芯少模光纤

5.1 PANDA 环形芯光纤

文献[17]提出了一种保偏 PANDA 环形芯光纤,其特征是环芯与两个应力施加棒的组合. 环形芯结构,如在 OAM 模式支持的环形芯光纤,与具有高折射率对比度的芯和包层是圆形对称的,从而有效地防止高阶模式的截止和 HE、TE、TM 和 EH 模式的分离. 两个应力施加棒引起双折射,分离剩余简并模式,即偶数和奇数的 HE 或 EH 模式. 选择光纤结构参数以支持 10 偏振和空间分布保持模式,相邻模式之间的所有有效折射率差异满足 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$ (满足这样的有效折射率差可以消除模式简并诱导的模式串扰对 MIMO 系统的影响^[18]). 覆盖整个 C 和 L 波段的宽波长范围的宽带特性也是可实现的,这表明与成熟 WDM 技术的兼容性.

PM-PRCF 的横截面原理图和有效折射率图如图 12 所示,包层直径为 W ,环芯与应力施加棒之间的间隙是 a ,环形芯的内半径、外半径和应力施加杆的半径分别为 r_1 、 r_2 和 r_3 . 包层由 1550 nm 处折射率 $n_1 = 1.444$ 的二氧化硅制成,环形芯为掺杂 GeO_2 的二氧化硅,因折射率 $n_2 = 1.474$,对应于 SiO_2 中掺杂比例 0.202 分子数的 GeO_2 . 具有折射率 $n_3 = 1.436$ 的应力施加棒的材料是掺有比例 0.3 的 B_2O_3 分子数的二氧化硅,这已被报道并用于高双折射光纤的实际制造中,归一化频率定义为 $V = r_2 \cdot 2\pi \sqrt{(n_2^2 - n_1^2)} / \lambda$, $\rho = r_1 / r_2$,并给出了建模的详细弹性

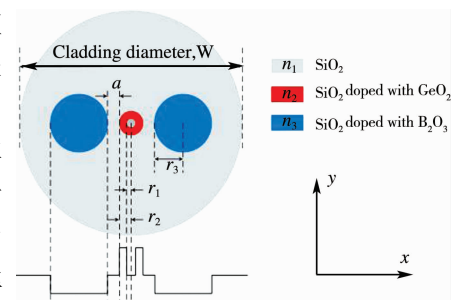


图 12 PM-PRCF 横截面示意图

材料参数. 从文献中获得了 SiO_2 包层和 $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ 环芯的弹性系数, 而相应的 $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 应力施加棒的弹性系数可以在参考文献中找到.

为了确定支持 10 个本征模(两个基模、四个第一高阶模和四个第二高阶模)的 PM-PRCF 的结构尺寸, 同时满足相邻模式间的有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$ 的要求, 设定在波长 1550 nm 处, $W = 125 \mu\text{m}$, $a = 1 \mu\text{m}$, $r_3 = 20 \mu\text{m}$ 并扫描两个参数 V (从 4 到 6)和(从 0.3 到 0.85)以计算 Δn_{eff} 值. 研究确定了 $V = 4.51$ 和 $\rho = 0.57$ 被作为目标光纤的结构尺寸.

光纤本征模轮廓明显受到光纤结构的影响, 得益于高对比度折射率结构, 环形芯中存在的强电场和场梯度. 图 13(a)给出了在没有两个应力施加杆的情况下, 环芯处的矢量模式强度分布以及电场极化方向. 所有的模式显示圆对称图案和弯曲极化(除了 HE_{11x} 和 HE_{11y}). 如图 13(b)所示, 随着两个应力施加棒的引入, 模式轮廓从环形形状扭曲成相应的线性偏振(LP)模式强度分布, 而偏振方向变成水平或垂直. 根据双折射理论, 应力施加杆所引起的应力各向异性增加了相同阶数定向正交的两个相邻模式的 Δn_{eff} , 应力双折射的强度取决于环芯与应力施加棒之间的间隙 a . 当应力被施加到环芯上时, 模式对之间发生有效折射率分离, 从矢量模式演化到相应 LP 模式. 随着 a 的减少, 施加在环芯上的应力得到增强, 导致除了 $\text{LP}_{11y}^{\text{odd}}$ 和 $\text{LP}_{11y}^{\text{even}}$ 以外的所有的 Δn_{eff} 值增加. 然而, 对于 $a > 1 \mu\text{m}$, 它仍然在 10^{-4} 以上. 尽管偶数和奇数第二高阶模式($\text{LP}_{21y}^{\text{odd}}$ 和 $\text{LP}_{21y}^{\text{even}}$, $\text{LP}_{21x}^{\text{odd}}$ 和 $\text{LP}_{21x}^{\text{even}}$)的 Δn_{eff} 值之间的分离严重受到 a 的影响, 其他六种模式(两个基模和四个第一高阶模)在 $1 \mu\text{m} > a > 5 \mu\text{m}$ 范围内持续满足 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$.

应力施加杆的半径与制造工艺的难度、PM-PRCF 的性能密切相关, 为了确定 r_3 的值, 以简化制造工艺并实现目标的 Δn_{eff} , 研究了 Δn_{eff} 对 r_3 的依赖性. 相邻模式 Δn_{eff} 的值几乎不受变化 r_3 的影响, 除了 LP_{01x} 和 LP_{01y} , $\text{LP}_{21y}^{\text{even}}$ 和 $\text{LP}_{21x}^{\text{odd}}$, $\text{LP}_{11y}^{\text{even}}$ 和 $\text{LP}_{11x}^{\text{even}}$. 尽管 r_3 减少时值 Δn_{eff} 减小, 但是在 $r_3 > 8 \mu\text{m}$ 范围内, 折射率差保持 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$. 所设计的 PM-PRCF 对 r_3 的变化应具有增强的耐受性, 因此选择合适 r_3 的值(如 $8 \mu\text{m}$), 其制造工艺更简单.

通过利用高对比度折射率环芯的优势, 设计的 PM-PRCF 获得不同极化模式的大有效折射率的分离, 即 $\text{TE}_{01}/\text{TM}_{01}$ 和 HE_{21} 的第一高阶、 $\text{HE}_{31}/\text{EH}_{11}$ 的第二高阶的大有效折射率的分离. 两个应力施加棒的引入带来双折射, 将剩余简并模, 即同阶的偶数模和奇数模分离. 在本小节的光纤结构实现了 10 种模式都与它们相邻的模式分离, $\text{LP}_{11y}^{\text{odd}}$ 和 $\text{LP}_{21x}^{\text{even}}$ 的最大 Δn_{eff} 值为 6.41×10^{-3} , $\text{LP}_{21y}^{\text{odd}}$ 和 $\text{LP}_{21y}^{\text{even}}$ 的最小 Δn_{eff} 可达 1.29×10^{-4} .

评估 PM-PRCF 在宽波长范围从 1500-1630 nm 的性能, 覆盖整个 C 和 L 波段. 结果显示, 10 种模式在较宽范围内最小 Δn_{eff} 值为 1.12×10^{-4} , 图 14 可得, 除了 $\text{LP}_{21y}^{\text{odd}}$ 在 1630 nm 处的最大色散 -104 ps/nm/km 有点大外, 所有模式的色散(D)都与标准单模光纤的值兼容, 该光纤色散可以通过建立的色散补偿技术得到补偿.

所设计的 PM-PRCF 的制备, 可以通过使用发达的光纤制造技术来实现. 通过改进的等离子体化学气相沉积工艺已经实现了具有高折射率对比度(更复杂的结构)的环形芯结构, 并用于 OAM 模式的传输. 应力施加棒在熊猫光纤中广泛用于维持模式极化, 现有的光纤制造技术为这种 PM-PRCF 的制造提供了坚实的基础.

5.2 低损耗少模环形芯光纤

在绝大多数 FMF 传输系统中, 多输入多输出(MIMO)数字信号处理(DSP)是必要的要求, 以便补偿通常由于模式耦合而发生的光学模式之间的线性串扰. 作为模式数量(信息信道)增加, 所需的 MIMO 处理的复杂性迅速增加; 如果可以减少模式耦合, 则可以大大简化(或甚至可能避免)MIMO 处理的使用, 从而增加 MDM 方法的可行性和可扩展性. 近期人们提出了支持单径向模式(即 m (整数)为 LP_{m1} 模式)的少模环形光纤(FM-RCF)理论和实验, 显示出在 DSP 复杂度较低的情况下提

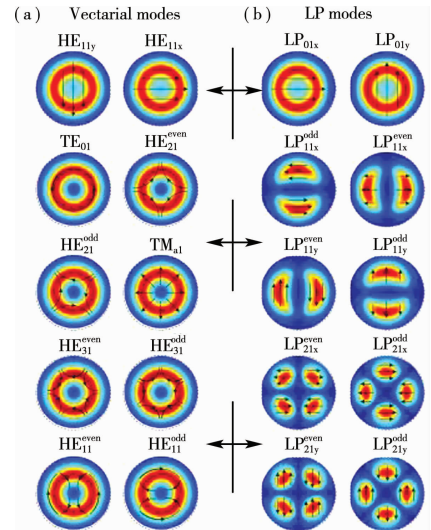


图 13 10 个模式强度分布和电场方向 (a) 无两个应力施加杆; (b) 有两个应力施加杆

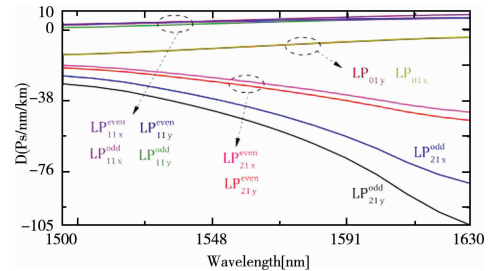


图 14 10 种模式的色散

高 MDM 系统传输容量的巨大潜力^[19-21]. 在 FM-RCF 中, 相邻方位角模式之间的有效折射率差异随着方位角模式数量的增加而明显增加, 这可导致高阶方位角模式之间的相对弱模式耦合. 这样, 通过仅使用 MIMO 处理来恢复在那些经历强模式耦合和在相同模式组内的模式之间的低阶方位角模式上承载的信号, 可以降低 DSP 复杂度. 文献[22]设计并成功制造了一个 25.3 km 长的低损耗少模环形芯光纤 FM-RCF, 支持 4 个模式组(即 7 种空间模式, 包括空间和偏振简并). 所有导模的光纤衰减约为 0.3 dB/km, 这是目前 FM-RCF 系列中报告的最低光纤损耗. 图 15 为一种四线性偏振模式 4-LP(LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₃₁) 环形芯光纤 RCF 横截面, 折射率以及四种线性偏振模式强度分布图^[22]. 图中、分别为环形芯少模光纤环形芯的环芯内半径和环芯外半径, $r_1=3.8 \mu\text{m}$, $r_2=7.3 \mu\text{m}$, $\Delta n=0.015$ 为环形芯纤芯折射率与包层折射率差. 4-LP 环形芯少模光纤 LP₃₁ 模式在波长为 1550 nm 的归一化传播常数 $B_{LP31} = \frac{n_{\text{eff},31}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} = 0.23$, 可以提供很好的模式引导.

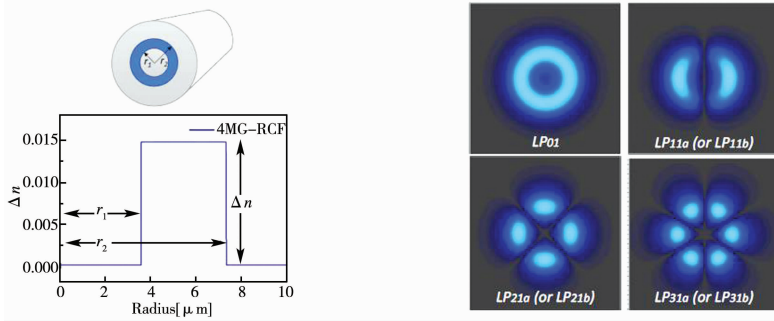


图 15 一种 4-LP 环形芯少模光纤横截面、折射率分布以及四种模式电场强度分布

图 16 为一种 4-LP 环形芯少模光纤有效折射率随入射光波长的变化图. 如图所示, 在波长 1.53-1.56 μm 范围内, 随着波长的增加, 四种模式的有效折射率而减小, LP₀₁ 与 LP₁₁ 模式之间的有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff},01} - \Delta n_{\text{eff},02}$ 为 8×10^{-4} , 其余高阶模间有效折射率差均大于 2×10^{-3} , 较大的有效折射率差有效地减小了 4-LP 环形芯少模光纤四种模式间耦合. 由于相邻高阶模式之间的大的有效折射率差, 降低 MDM 传输所需的 MIMO DSP 复杂度方面是非常有益的.

研制出的 4-LP 环形芯少模光纤的参数: 环芯内半径 $r_1=3.5 \mu\text{m}$, $r_2=7.5 \mu\text{m}$, 环形芯纤芯折射率与包层折射率差 $\Delta n=0.0135$, 外包层直径为 125 μm , 与设计的环形芯少模光纤一致. 25.3 km 环形芯少模光纤的总体衰减的平均测量值为 0.32 dB/km, 模式间串扰在 0.3 dB/km 左右, 在给定固定波长 1550 nm 后, 除 LP₃₁ 模式外其余模式的弯曲损耗在弯曲半径 5-32.5 mm 的范围内均为 0 dB, LP₃₁ 模在弯曲半径 5-13 mm 的范围内的弯曲损耗在 5 dB 内, LP₁₁、LP₂₁、LP₃₁ 差分模式群时延分别 3.9 ps/m、11 ps/m 和 18.2 ps/m, 高阶模间模式耦合可忽略.

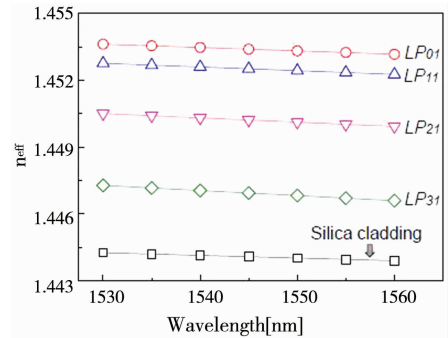


图 16 一种 4-LP 环形芯少模光纤有效折射率随波长的变化

6 超模光纤

近年来, 一种多实芯强耦合的超模光纤也得到了大家的关注, 多实芯超模光纤具有更大的有效模场面积、低非线性系数、模场密度大、低模式依赖损耗、低模式耦合和低差分模式群时延^[6,23-24]. 超模可以看作各纤芯模式的强耦合, 具有更好的传输特性, 在模分复用中具有重要的学术价值和应用价值, 本小节选取文献中的 3 实芯超模光纤进行讨论.

图 17 为一种强耦合三芯超模光纤模式分布图^[6,23,24]. 图 17(a) 为超模光纤模式的电场幅度分布图(a1、b1、c1)和相位图(a2、b2、c2). 在强耦合三芯超模光纤设计时, 三个芯被设定成拥有相同的参数, 包括芯半径 r 、芯间距 d 、纤芯与包层折射率差和归一化频率 V . 三个独立芯间模式影响通过模式耦合分析可以用模式耦合等式来描述^[24].

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = -j \bar{M} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \beta_0 & c & c \\ c & \beta_0 & c \\ c & c & \beta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 A_i 为第 i 个芯的复振幅, β_0 为独立芯的传播常数, c 为芯间的耦合系数, \bar{M} 为厄米特矩阵, 使矩阵对角化, 例如 $Q^{-1}\bar{M}Q = \Lambda$, Λ 表示对角矩阵, 此处对角线上的因素分别为 $\Lambda_{11} = \beta_0 + 2c$, $\Lambda_{22} = \Lambda_{33} = \beta_0 - c$, 三个因素分别表示超模的传播常数。

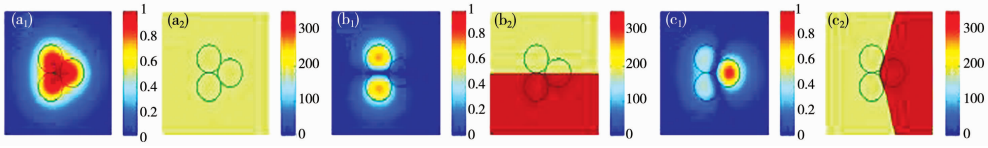


图 17 超模光纤模式的电场幅度分布图(a1、b1、c1)和相位图(a2、b2、c2)

研究表明,与常规少模光纤比,超模光纤的超模具有大有效面积、高限制因子和大有效折射率差的一致性。也就是说,与常规少模光纤比,所有超模保持着较小模式耦合、低损耗和低非线性系数;这对长距离模分复用来说至关重要。

7 本课题组近期提出的少模光纤

本节结合多芯超模光纤与环形芯少模光纤,本课题组提出了新型三环形芯少模光纤^[25]。光纤由三个具有大折射率的环形纤芯、凹陷折射率区域以及纯二氧化硅包层组成。图 18 为三环形芯少模光纤中超模在 $1.55 \mu\text{m}$ 处 X 偏振的电场分布及电场方向(6 个 Y 偏振简并模式略)。三环形芯少模光纤因其芯间距比普通多芯光纤小实现了强耦合超模;超模可实现大有效模场面积和更高的模式密度,进而有效的减小非线性效应,实现更好的光纤传输。

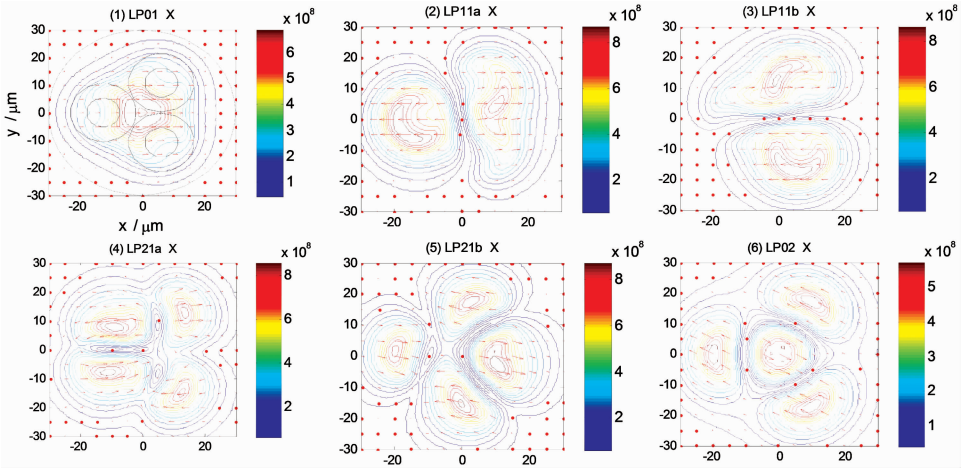


图 18 三环形芯少模光纤中超模在 $1.55 \mu\text{m}$ 处 X 偏振的电场分布

三环形芯少模光纤设计中引入三环芯的结构,三环芯依照等边三角形对称设置,等边三角形内心和外心合一,导致折射率分布从整体上依然存在圆周特性。采用矢量模式分析,从产生的 LP_{01} 超模的电场分布等高线上可以反映出该对称性完好,为了与此对应,将等边三角形内心和外心设置到坐标原点。

研究表明,三环形芯少模光纤可以实现大有效面积、低非线性系数和低差分模式群时延的四种超模传输。四种超模的有效模场面积比标准单模光纤的大得多,随入射光波长增加而增大;四种超模的非线性系数比标准单模光纤的小得多,随入射光波长增加而减小;弯曲损耗随输入波长的增加而增大,随弯曲半径的增大而减小。该光纤的非线性系数和差分模式群时延在波长范围 $1.3\text{--}1.6 \mu\text{m}$ 内平坦分布。与几何尺寸等效有效折射率等效的单芯少模光纤基模 LP_{01} 相比,文中所提出三环形芯光纤超模具有大有效折射率差、低弯曲损耗和低差分模式群延迟的优势。

8 结论与讨论

单模光纤通信面临 Shannon 极限,基于少模光纤的模分复用通信技术成为光纤通信领域的研究热点。鉴于此,结合本课题组开展的模分复用方面的部分工作,比较系统深入地分析讨论了模分复用研究过程中,相对突出、经典的部分研究工作和最新进展;涉及几种典型光纤的结构设计、特性以及应用;分析讨论了六模

式折射率阶跃分布单芯少模光纤、六模式折射率渐变分布单芯少模光纤、用于无 MIMO 数据传输的椭圆芯少模光纤、用于光学参量放大的椭圆芯少模光纤、由中心圆孔和椭圆环芯组成的保偏少模光纤、具有 10 种保偏模式的 PANDA 环芯光纤、用于模分复用传输的低损耗少模环形光纤以及超模光纤的结构设计、特性及应用,最后,给出了本课题组近期提出的新颖的三环芯 FMF 以及 FMF 研究发展趋势. 这些工作相对出色,每个工作可引领一个研究方向,为模分复用进一步研究提供了启发和重要支持. 今后的较长一段时间,少模光纤研究中的采用特殊材料和光纤结构设计来实现大有效折射率差、低衰减、低色散、大有效模场面积和低非线性系数等指标仍然是通信领域需要继续探索的研究热点;模分复用的研究还将进一步聚焦到少模光纤、复用解复用器、模分复用传输以及模式组相关器件与传输、模分复用与 MIMO 融合等.

参 考 文 献

- [1] Tom Kalil. Obama Administration, Deputy Director for Policy at OSTP[M]. Washington D C: Big Data Research and Development Initiative, 2012.
- [2] 侯小毛, 张福泉, 刘定. 移动云环境下基于预测图的动态协调过程推荐[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 96-100.
- [3] 郑宏军, 黎昕, 白成林. 啁啾脉冲在光纤中的传输[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [4] Wang Jian, Yang Jeng-yuan, Irfan M Fazal, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488-496.
- [5] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [6] Li Guifang, Bai Neng, Zhao Ningbo, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4): 413-487.
- [7] Marianne Bigot-Astruc, David Boivin, Pierre Sillard. Design and fabrication of weakly-coupled few-modes fibers[C]. // Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2012.
- [8] Pierre Sillard, Denis Molin. A review of few-mode fibers for space-division multiplexed transmissions[C]. // European Conference & Exhibition on Optical Communication, 2013.
- [9] Pierre Sillard, Marianne Bigot-Astruc, Denis Molin. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(16): 2824-2829.
- [10] Liang Junpeng, Mo Qi, Fu Songnian, et al. Design and fabrication of elliptical-core few-mode fiber for MIMO-less data transmission[J]. Optics Letter, 2016, 41(13): 3058-3061.
- [11] Guo C, Zhang Z, Zhao N, et al. Design of elliptical-core few-mode fibers for optical parametric amplification[C]. // Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2017.
- [12] Zhao Jiajia, Tang Ming. Polarization-maintaining few mode fiber composed of a central circular-hole and an elliptical-ring core[J]. Photonics Research, 2017, 5(3): 261-266.
- [13] Fatih Yaman, Bai Neng, Zhu Benyuan, et al. Long distance transmission in few-mode fibers[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 13250-13257.
- [14] Riesen N, Love J D, J W Arkwright. Few-mode elliptical-core fiber data transmission[J]. IEEE Photonics Technol Letters, 2012, 24(5): 344-346.
- [15] Ezra Ip, Giovanni Milione, Li Ming-Jun, et al. SDM transmission of real-time 10GbE traffic using commercial SFP + transceivers over 0.5km elliptical-core few-mode fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17120-17126.
- [16] Lixian Wang, Sophie LaRochelle. Design of eight-mode polarization-maintaining few-mode fiber for multiple-input multiple-output-free spatial division multiplexing[J]. Optics Letter, 2015, 40(24): 5846-5849.
- [17] Yan Haozhe, Li Shangyuan. Design of PANDA ring-core fiber with 10 polarization-maintaining modes[J]. Photonics Research, 2017, 5(1): 1-5.
- [18] Ramachandran S, Fini J, Mermelstein M, et al. Ultra-large effective-area, higher-order mode fibers: a new strategy for high-power lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2008, 2(6): 429-448.
- [19] Jin Xianqing, Ariel Gomez, Shi Kai, et al. Mode coupling effects in ring-core fibers for space-division multiplexing systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(14): 3365-3372.
- [20] Feng Feng, Guo Xuhan, George S D Gordon, et al. All-optical mode-group division multiplexing over a graded-index ring-core fiber with single radial mode[C]. // Optical Fiber Communication Conference, 2016.
- [21] Nejad R M. Mode division multiplexing using orbital angular momentum modes over 1.4 km ring core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(18): 4252-4258.
- [22] Jung Yongmin, Kang Qiongyue. Low-loss 25.3 km few-mode ring-core fiber for mode-division multiplexed transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(8): 1363-1368.
- [23] Cen Xia, Bai Neng, Ibrahim Ozdur, et al. Supermodes for optical transmission[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16653-16664.

- [24] Cen Xia, Bai Neng. Supermodes in strongly-coupled multi-core fibers[C]. // Optical Fiber Communication Conference, 2013.
- [25] Yu Ruyuan, Zheng Hongjun, Li Xin, et al. A novel three-ring-core few-mode fiber with large effective area and low nonlinear coefficient [J]. Optoelectronics Letters, 2018, 14(1): 30-35.

Recent Progresses on Few Mode Fibers for Mode-Division Multiplexing System

WANG Xiao¹ ZHENG Hong-jun¹ LI Xin¹ LIU Yang¹
YU Ru-yuan¹ BAI Cheng-lin¹ HU Wei-sheng²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract In recent years, mode-division multiplexing (MDM) using few-mode fibers (FMF) have been intensively investigated as the method to increase transmission capacity beyond the nonlinearity Shannon limit of single-mode fibers (SMF). FMFs have drawn much attention in optical communications. Based on some of the works of our group on MDM, we systematically and thoroughly analyzes some classical research works and the latest progress on MDM, involving the FMF design, characteristics and its wide applications. We firstly review and discuss some types of FMFs such as step index FMF, graded index FMF, elliptical-core FMF for MIMO-less data transmission, polarization-maintaining FMF composed of a central circular-hole and an elliptical-ring core, polarization-maintaining PANDA ring-core FMF (PM-PRCF), low-loss ring-core FMF and supermode FMF. Then, we propose a novel supermode FMF with ring cores. Finally, the development trend of FMF research is presented. It provides effective support for the application of MDM front-haul transmission system. Using special materials and fiber structure design to achieve large effective refractive index difference, low attenuation, low dispersion, large effective mode area and low nonlinear coefficient in the study of FMF is still our research focus for a long time.

Key words mode-division multiplexing; few-mode fibers; elliptical-core FMF; polarization-maintaining FMF; polarization-maintaining PANDA ring-core FMF; ring-core FMF; supermode FMF