

引用本文:童晓玲,刘晨宇,梁磊,等.单模传输约束下HCF低耦合损耗结构优化方法[J].光通信技术,2026,47(4):103-109.

单模传输约束下HCF低耦合损耗结构优化方法

童晓玲²,刘晨宇²,梁磊^{1,2*},戴澍²,李振宇²

(1.武汉理工大学 光纤传感技术与网络国家工程研究中心,武汉 430070;2.武汉理工大学 机电学院,武汉 430070)

摘要:为降低实芯光纤(SCF)与空芯光纤(HCF)互连中模场失配和相位不同步导致的耦合损耗,提出 SCF-渐变折射率光纤-空芯光纤(HCF)结构以探究单模传输约束下 HCF 低耦合损耗结构的优化方法。对耦合端嵌套反谐振无节点光纤(NANF)几何参数定向优化,实现与 SCF 基模的场形和相位同步匹配,并保持单模传输,基于有限元数值模拟,分析包层管数 N 、管间隙 d 及管径比 D_1/D 对模式特性的影响。仿真结果表明:当 $N=7$, $D_1/D=0.9$, $d=0.9\ \mu\text{m}$ 时,耦合损耗从 0.116 dB 降至 0.069 dB,高阶模抑制比 $R>250$;在 d 为 0.5~1.5 μm 时仍保持 $R>50$ 。

关键词:耦合损耗;模场适配;有限元分析;空芯光纤;单模特性

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)04-0103-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.016

Optimization method for HCF structures with low coupling loss under single-mode constraints

TONG Xiaoling², LIU Chenyu², LIANG Lei^{1,2*}, DAI Shu², LI Zhenyu²

(1. National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To reduce the coupling loss caused by mode-field mismatch and phase asynchronization in the interconnection between solid-core fiber(SCF) and hollow-core fiber(HCF), an SCF-graded-index fiber-HCF structure is proposed to investigate the optimization method for HCF structures with low coupling loss under single-mode transmission constraint. The geometric parameters of the nested antiresonant nodeless fiber(NANF) at the coupling end are directionally optimized to achieve mode-field and phase synchronization with the fundamental mode of the SCF while maintaining single-mode transmission. Based on finite element numerical simulations, the effects of the number of cladding tubes N , tube gap d , and tube diameter ratio D_1/D on the mode characteristics are investigated. The results show that at $N=7$, $D_1/D=0.9$, and $d=0.9\ \mu\text{m}$, the coupling loss is reduced from 0.116 dB to 0.069 dB, with a higher-order mode suppression ratio $R>250$. Over the range of d from 0.5 to 1.5 μm , R remains above 50.

Key words: coupling loss, mode-field matching, finite-element analysis, hollow-core fiber, single-mode characteristics

0 引言

近十年来,空芯反谐振光纤(HC-ARF)的结构设计与制备技术快速发展,其传输衰减已降至 0.174 dB/km^[1]。HC-ARF 的导模主要在近真空的低折射率介质中传

收稿日期:2025-07-21。

基金项目:海南省自然科学基金项目(525QN389)资助。

作者简介:童晓玲(1979—),女,湖北随州人,博士,副教授,武汉理工大学机电工程学院教师。主要研究方向为光纤传感技术、新型光纤传感器及信息处理、光纤智能材料与结构、基于光纤传感的大型装备与结构的安全监测与预警等。

***通信作者:**梁磊(1963—),男,博士,教授,主要从事光纤传感方面的研究。



播,导光场与玻璃结构的重叠显著减小,使其具有更低非线性与更高激光损伤阈值,在高功率激光传输系统中具有重要应用潜力^[2]。随着空芯光纤(HCF)本征损耗持续降低,如何将其与现有实芯光纤(SCF)系统实现稳定、低损耗互连,已成为推动其工程应用的关键问题之一。

在互连中,HCF 为降低传输损耗往往采用较大纤芯尺寸,而 SCF 输出基模的模场直径(MFD)通常为 6~25 μm ^[3],两者模场差异会导致传统熔接或直接对接方式易引入较高耦合损耗,限制了 HCF 在高功率系统中的进一步推广。根据光纤模式耦合理论,功率转移由耦合界面处电场振幅分布的空间重叠与相位匹配共

童晓玲,刘晨宇,梁磊,等:单模传输约束下HCF低耦合损耗结构优化方法

同决定^[4]。因此,通过结构设计改善SCF与HCF在场形与相位上的一致性,是降低耦合损耗的核心途径。现有研究多从入射端出发,通过调制SCF侧模场来提高匹配度^[5],例如光纤锥化并结合抗反射涂层^[6]、热扩芯技术(TEC)^[7]以及渐变折射率(GRIN)光纤作为模场适配器^[8],并配合自由空间整形或插拔式连接等方案实现低损耗互连^[9-10]。上述工作充分表明模场匹配对降低耦合损耗具有显著作用,但总体上更侧重于SCF端的调制,针对耦合端HCF结构进行定向优化以同步改善场形与相位条件的研究仍相对不足。另外,HCF的基模场形与相位特性受纤芯尺寸、薄壁厚度、包层管数、管间隙及管径比等参数控制^[11-12]。参数调谐有望降低耦合损耗,但也会改变管模与高阶模(HOMs)的演化,从而影响高阶模抑制能力。

针对SCF与HCF互连中场形与相位失配导致的耦合损耗偏高问题,本文构建SCF-GRIN光纤-HCF结构,以探究单模传输约束下HCF低耦合损耗结构的优化方法。

1 耦合理论

在光纤与自由空间光场或其他波导结构进行耦合时,能量传输效率主要由两端光场在空间分布和相位特征上的匹配程度所决定。为了对这种匹配程度及其对耦合损耗的影响进行定量刻画,通常采用模场重叠积分进行分析。该方法以电磁场的正交性和功率守恒为基础,将2个光场模式之间的能量耦合关系表示为场分布的内积形式,从而实现对耦合效率的定量描述。

设入射到HCF输入端的光场基模电场分布为 E_i ,HCF待耦合的基模(LP₀₁模)电场分布为 E_t 。两者在横截面上的复电场分布共同决定了能量耦合的程度。根据电磁场模态展开的思想,入射光场在光纤基模方向上的功率分量可以写成场的内积形式。为了得到无量纲的耦合效率,需要分别对光纤基模和入射光场的功率进行归一化。在上述基础上,模场重叠积分给出的标准耦合效率^[3]表达式为

$$\eta = \frac{\left| \iint E_i^* E_t ds \right|^2}{\iint |E_i|^2 ds \iint |E_t|^2 ds} \quad (1)$$

式中: η 表示耦合效率,*表示复共轭,ds表示横截面积分微元。

则耦合损耗 L 的表达式为

$$L = -10 \lg \eta \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以看出,耦合损耗由两光场在横向分布和相位上的匹配程度共同决定:分子中的内积项综合反映了振幅分布的重叠程度及相对相位关系,而分母中的功率项则起到归一化的作用。

2 耦合数值优化

2.1 模型构建与方法

本文使用COMSOL Multiphysics软件对SCF-GRIN光纤-HCF结构进行有限元数值模拟,该结构原理图如图1所示。其中,HCF部分选取当前HCF中性能最优的嵌套反谐振无节点光纤(NANF)。GRIN光纤在该结构中作为模场尺寸适配器,将经过SCF传输的光束逐步扩展到与NANF所需模场半径相匹配的大小。本文研究的重点在于通过改变GRIN长度与NANF光纤参数使得SCF与HCF的模场更加适配以降低耦合损耗,因此在仿真时采用对接耦合的方式来研究二者之间的模场适配,可不考虑菲涅尔反射的影响。同时,在实际工程应用中,可通过减反(AR)涂层、折射率匹配介质/胶以及端面角度切割等方法^[15]有效抑制菲涅尔反射引起的回反与附加插入损耗。

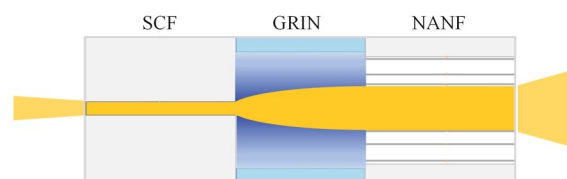


图1 SCF-GRIN光纤-HCF结构原理图

为了实现从光场输入端到耦合端的模场尺寸适配,本文模拟了光束从SCF出射,经GRIN光纤传输后,在自由空间中的演化过程。基于COMSOL Multiphysics软件中的波束包络接口对3种商用GRIN光纤进行了对比模拟,3种光纤的芯径分别为50、100、200 μm,其他参数设置如表1所示。

表1 GRIN光纤的参数

GRIN 光纤类型	纤芯直径/μm	包层直径/μm	数值孔径
GRIN OM2	50	125	0.20
GRIN100	100	125	0.29
GRIN200	200	220	0.22

在1 064 nm的工作波长下,传输光束的模场直径(MFD)随GRIN光纤长度的变化关系如图2所示。图中节距(pitch)是指光线在纤芯中由于折射率梯度而发生的周期性发散-聚焦-再发散-再聚焦的传播周

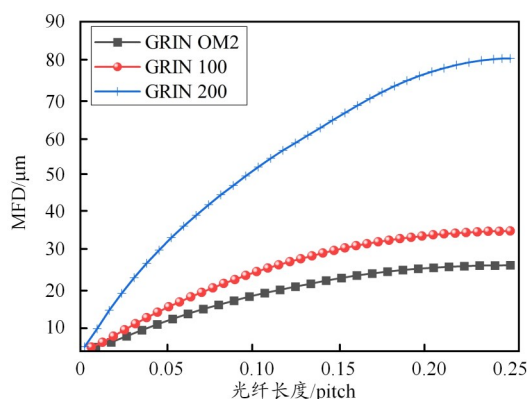
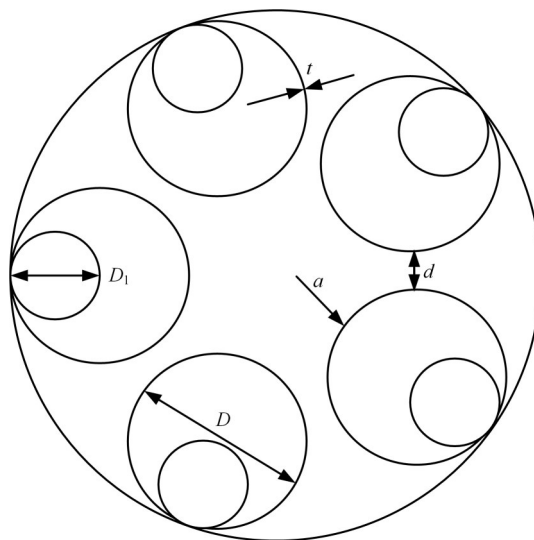


图2 GRIN 光纤长度对 MFD 的影响

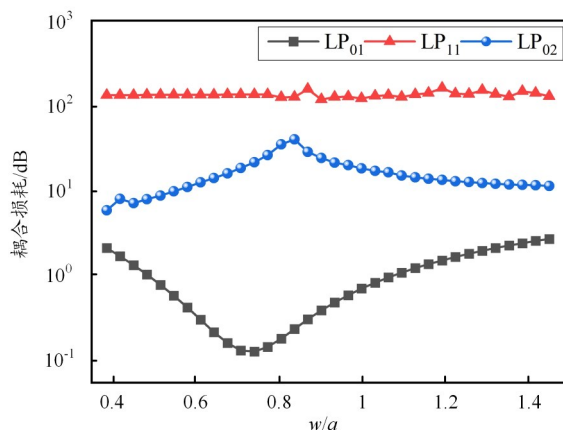
期。可以看出, MFD 随光纤长度增大而逐渐增加, 在约 0.25 pitch 处达到最大值。由于前端 SCF 的 MFD 为 $7.5\ \mu\text{m}$, 则光纤的 MFD 数值下限为 $7.5\ \mu\text{m}$, 结合图 2 数据可知, 基于 OM2 光纤可以实现约 $7.5\sim 22\ \mu\text{m}$ 的 MFD 调节范围, 而 GRIN100 和 GRIN200 可分别覆盖约 $7.5\sim 31\ \mu\text{m}$ 和 $7.5\sim 85\ \mu\text{m}$ 的 MFD 调节范围。本文选用 GRIN OM2 光纤作为模场适配器时, 所需光纤长度最短仅约 $265\ \mu\text{m}$, 且在 $1\ 064\ \text{nm}$ 波段石英基材料吸收低, 因此在千瓦级别工作时吸收致热功率小于 $1\ \text{mW}$ 量级, 据此估算的中心温升 $< 0.2\ \text{K}$, 对应的相对光焦度扰动 $< 0.1\%$, 聚焦位置漂移或模场失配可忽略, 因此上述结果在高功率工作条件下依然成立。

从模拟结果可知, 对于不同模场大小的 HCF, 只需选择合适芯径的 GRIN 光纤并依据目标模场尺寸进行有目的的长度选择, 可将其作为特定的模场适配器, 以获得更低的耦合损耗。同时, 增大 GRIN 光纤的芯径虽然可以显著拓展可实现的 MFD 调节范围, 但也会带来聚焦位置距离光纤端面更远、在 GRIN 光纤中更易激发高阶模式等代价, 需要在实际设计中综合权衡。

本文采用的 5 管 NANF 结构示意图如图 3(a) 所示。图中参数设置如下: NANF 直径固定为 $2a=30\ \mu\text{m}$, 包层管壁厚度 $t=360\ \text{nm}$, 相邻大包层管之间的间隙 $d=4\ \mu\text{m}$, 嵌套管尺寸通过大包层管直径比值 D_i/D 表征, $D_i/D=0.5$ 。在工作波长为 $1\ 064\ \text{nm}$ 时, 假设入射高斯光束与 NANF 完全同轴对准, 得到入射光束与 NANF 中部分导模之间的耦合损耗, 如图 3(b) 所示。可以看出, 对于基模 LP_{01} , 当光束束芯比 $w/a \approx 0.7$ (即 $\text{MFD}=21.21\ \mu\text{m}$) 时, 耦合损耗达到最小值。本文将此数值作为该 NANF 的有效 MFD; 在后续优化 NANF 结构参数的过程中, 每一组参数都会在 $w/a \approx 0.7$ 附近重新搜索耦合损耗的最优点。



(a) 5 管 NANF 结构示意图



(b) 各模式对应的耦合损耗值

图3 典型 5 管 NANF 结构及其耦合损耗

在上述最优耦合条件下, 模拟得到的基模耦合效率超过 97%, 对应的耦合损耗约为 $0.116\ \text{dB}$ 。进一步对比高阶模式可知, 由于高阶模在横向强度分布和相位结构上与入射高斯光束存在明显的对称性失配, 同时其传播常数与入射光场的相位匹配条件不满足, 高阶模相对于基模的耦合损耗显著降低。 LP_{11} 模式仅接收到可以忽略不计的入射功率, 耦合损耗大约为 $100\sim 140\ \text{dB}$; LP_{02} 模式由于其在方位对称性上与高斯光束更为接近, 耦合损耗约 $10\ \text{dB}$ 级别。

2.2 模场形状优化

为了进一步提升 SCF 与 HCF 之间的耦合损耗, 本文重点评估 NANF 几何参数对耦合损耗的影响规律及其物理机制。由于几何参数直接决定模式电场的径向分布, 本文以上述 NANF 结构为基准, 其他设置不变, 仅通过改变包层管数目 N 来调控模场分布。仿真

童晓玲,刘晨宇,梁磊,等:单模传输约束下HCF低耦合损耗结构优化方法

中,损耗在网格大小为 $\lambda/6\sim\lambda/10$ 内保持不变时,将二氧化硅区域的最大网格单元优化为 $\lambda/8$ (即 $0.13\ \mu\text{m}$)。对完美匹配层(PML)厚度进行收敛测试,将厚度设置为 $5\ \mu\text{m}$,发现当PML厚度充分大于硅胶管厚度时,损耗在较大的调谐范围内保持不变。不同包层管数目下耦合损耗与 w/a 之间的关系如图4所示。可以看出,随着包层管数目 N 的增加,最优耦合条件下的耦合损耗单调下降,同时对应的最优 w/a 也略有减小。

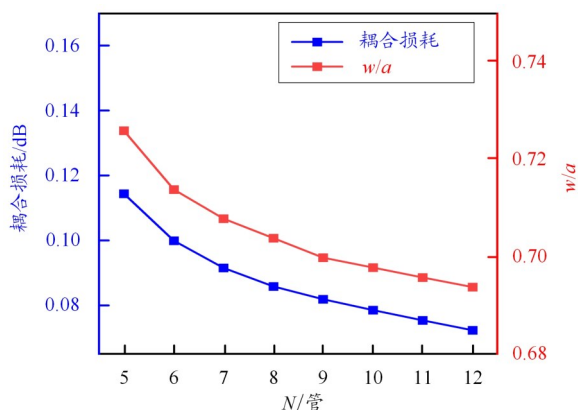


图4 不同包层管数目 N 下耦合损耗与 w/a 之间的关系

图5展示了在保持纤芯直径和包层管间隙不变的情况下,NANF基模在 N 分别为6、9、12这3种包层管数目时的场分布变化情况。可以看到,随着包层管数目的增多,光纤基模的模场分布圆度显著增强,从而提高了与近高斯入射光束之间的电场分布的匹配程度,降低了耦合损耗。在保持包层管间隙 d 恒定的前提下,增大 N 使包层在角向上的分布更加均匀,对纤芯模式的包围程度增强。尽管相邻包层管之间的间距未变,但由于圆周方向引入了更多管单元,整体角向填充率提高,使反谐振反射条件在更大角范围内得到满足,从而加强了对纤芯光场的限制作用并进一步降低了传输损耗。

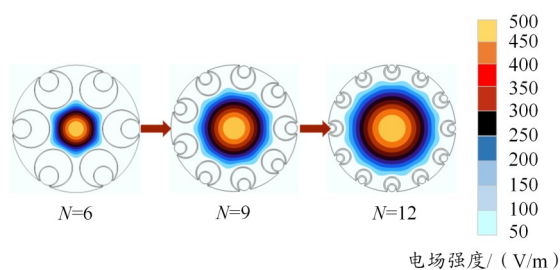


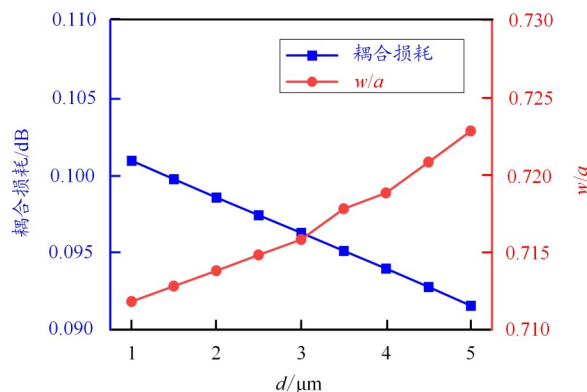
图5 基模形状随管数 N 的变化图

2.3 模场区域条件优化

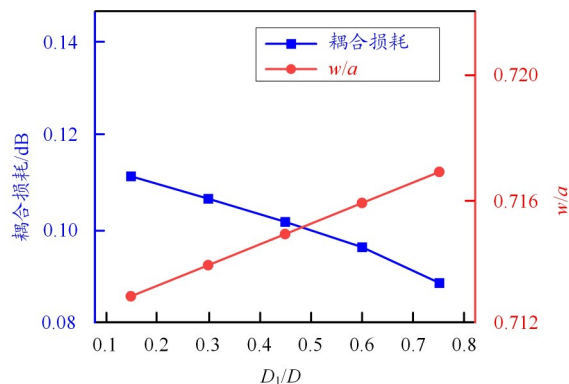
本文进一步分析了包层管间隙 d 和大小包层管径比 D_1/D 对传输与耦合性能的影响。仿真时,首先保持

纤芯直径 $2a$ 、大小包层管径比 D_1/D 以及壁厚 t 不变,采用六管结构,将包层管间隙 d 从 $1\ \mu\text{m}$ 增至 $5\ \mu\text{m}$ 。这相当于在维持纤芯尺寸不变的情况下,随着间隙增大,反谐振包层管半径逐渐减小。仿真结果如图6(a)所示,可以看出,随着包层管间隙 d 的增大,耦合损耗出现轻微下降,并伴随 w/a (表征MFD)同步增大。从模场重叠的角度看,当包层管变小、间距增大时,反谐振条件导致基模中相位发生变化,进一步导致振幅符号由正变负的符号失配区域在面积和幅度上均被压缩;相应地,该区域对重叠积分的负贡献减小,使重叠积分的绝对值增大,从而略微降低了入射高斯光束与基模之间的耦合损耗。

随后,保持大包层管直径 D 、间隙 d 、纤芯直径 $2a$ 和包层管厚度 t 不变,将 D_1/D 以0.15为步长从0.15提升至0.75。仿真结果如图6(b)所示。可以看出,随着嵌套管变大(即 D_1/D 增加),耦合损耗进一步降低,且其降幅明显大于单独增大包层管间隙 d 时的情况;与此同时,MFD继续增大。这是因为在大包层管直径固定时,若嵌套管过小,则基模在较大空间区域内存在



(a) d 对耦合损耗和光束束芯比 w/a 的影响



(b) D_1/D 对耦合损耗和光束束芯比 w/a 的影响

图6 d 与 D_1/D 对耦合损耗及光束束芯比 w/a 的影响

振幅符号翻转,从而削弱与处处为正的近高斯模场的重叠,导致耦合损耗上升;反之,增大嵌套管直径可以屏蔽部分符号翻转区域,使基模场分布在主瓣区更加接近高斯形状,从而提升模场重叠积分并降低耦合损耗。

3 单模特性研究

在尽可能保持低耦合损耗的前提下,为实现大幅度提升高阶芯模(HOM)限制损耗的目的,可以利用管模与高阶芯模之间的耦合:通过结构设计使高阶芯模的有效折射率与管模的有效折射率发生接近甚至相交,从而触发强耦合。由于管模通常具有比高阶芯模高出数个数量级的损耗,一旦发生有效耦合,便可显著提升相应高阶模的损耗。在前述低耦合损耗参数区域附近,本文研究了NANF结构参数与管模有效折射率之间的依赖关系,并在此基础上,针对性地调整结构,使管模有效折射率逼近损耗最低的高阶芯模,从而提升该模式的损耗。本文定义 R 为高阶模与基模限制损耗之比(即高阶模抑制比)^[13-14],作为衡量单模特性优劣的指标,并以 $R>50$ 作为满足单模工作的基本判据。

在保持 $2a=30\text{ }\mu\text{m}$, $t=360\text{ nm}$, $d=2\text{ }\mu\text{m}$ 且空芯与包层管均匀排布的条件下,本文首先以包层管数目 N 为唯一自变量,系统评估其对管模及4个代表性芯模(LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{02} 、 LP_{21})有效折射率 n_{eff} 的影响,结果如图7所示。可以看出, LP_{01} 模式的有效折射率始终保持在最高水平,并且几乎不随 N 的变化而波动,与管模之间始终存在足够的有效折射率间隙,从而避免了与管模发生耦合。相比之下,高阶芯模 LP_{11} 、 LP_{02} 与 LP_{21} 对应的有效折射率对 N 虽然不敏感,但随着结构参数的调

节,管模的有效折射率逐渐与高阶芯模的有效折射率接近,形成明显的耦合窗口。当包层管数目增大到 $N>7$ 时,管模的有效折射率随 N 的增加迅速下移,整体远离上述3种高阶芯模的轨道,导致高阶模与管模之间的耦合窗口逐渐关闭。由此可知,过多的包层管会削弱通过管模提升高阶模损耗的能力。本文权衡耦合损耗与单模稳定性,取包层管数目 $N=7$ 。在该设置下既能维持较低的实芯-空芯耦合损耗,又为后续通过管模选择性抑制高阶模提供了足够的设计自由度。

为进一步研究包层管间隙 d 和大小管径比 D_1/D 对传输与耦合性能的影响,保持 $2a$ 与 t 不变,采用七管结构,分别对包层管间隙 d 和大小管径比 D_1/D 开展单变量参数扫描:首先,固定 $d=2\text{ }\mu\text{m}$,将 D_1/D 的值从0.5以0.05的步长提升至0.9;然后,固定 $D_1/D=0.9$,将 d 从 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的步长递增至 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。对应得到的各芯模限制损耗,以及芯模与管模的有效折射率随参数变化的情况如图8所示。从图8(a)、图8(b)中管模有效折射率的变化可以看出:随着 D_1/D 增加,管模有效折射率则稳步上升;随着 d 增大,管模有效折射率整体呈单调下降趋势。其余芯模的有效折射率变化幅度相对较小,曲线整体较为平缓。上述趋势表明,在本文考虑的参数范围内,管模有效折射率主要由等效包层管半径控制。无论是减小 d 还是增大 D_1/D ,都会导致小包层管直径 D 增大。

从图8(c)、图8(d)可以看出,在当前NANF结构与波长窗口内, LP_{11} 模式是限制损耗最接近基模 LP_{01} 的高阶模。由于大小管径比 D_1/D 增大至0.9时,管模有效折射率已经逼近 LP_{11} 模式轨道。由于 LP_{11} 模式原本就具有最接近基模的限制损耗,只需通过管模耦合适度提升 LP_{11} 的损耗,即可较容易实现 $R>50$ 的目标。

当 $D_1/D=0.9$ 且 $d=1\text{ }\mu\text{m}$ 时,管模有效折射率与 LP_{11} 模式过于接近,导致 LP_{21} 模式反超 LP_{11} 成为损耗最接近基模的高阶模,从而削弱单模工作的稳定性。本文通过联合调节 d 与 D_1/D ,使管模有效折射率落在 LP_{11} 与 LP_{21} 模式的有效折射率轨道之间,由管模同时对这2条高阶模耦合通道产生抑制作用,避免某一高阶模长期占据最低高阶模损耗的位置。与仅针对单一高阶模进行提升相比,这种设计能够在工艺波动和参数扰动下提供更加稳定、可复现的单模传输特性。

4 仿真结果分析

考虑到 D_1/D 对单模性能的主导作用,本文优先将

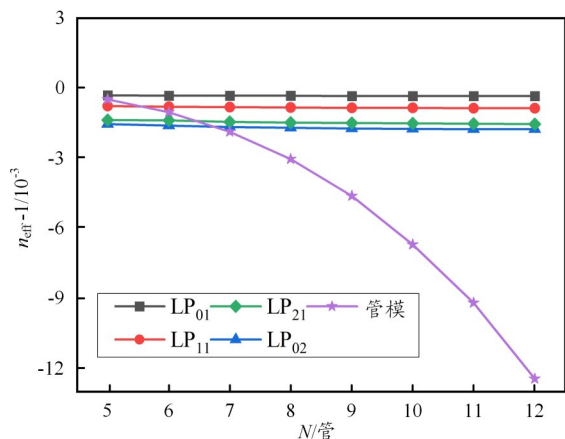
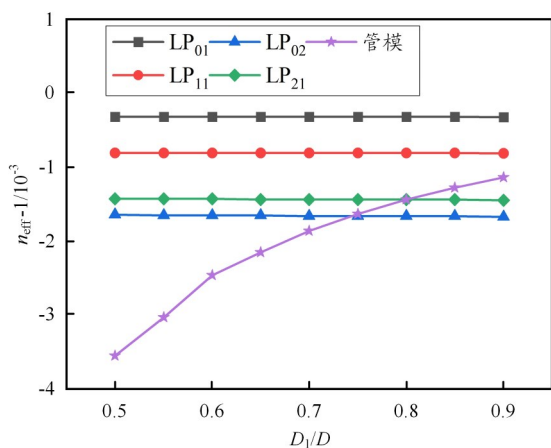
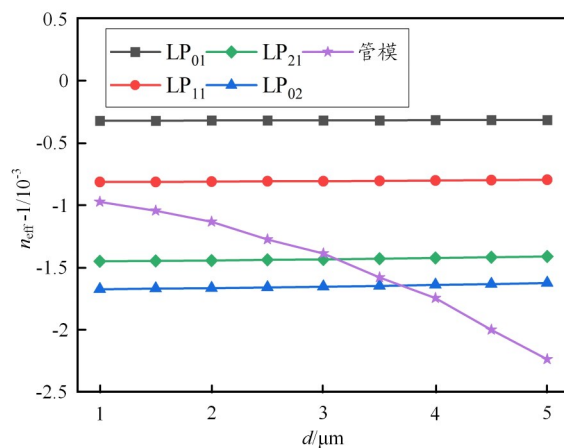


图7 管模及4个代表性芯模的有效折射率随 N 变化趋势

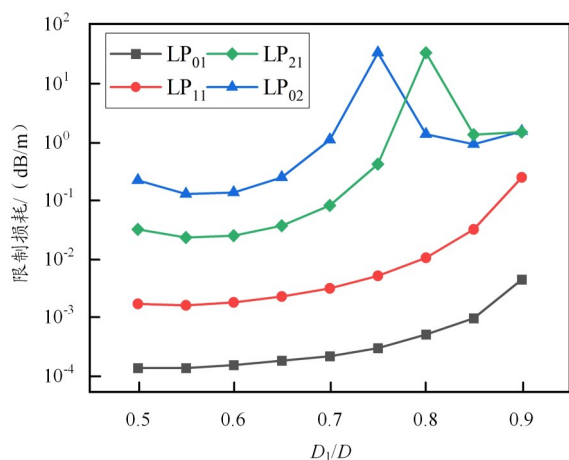
童晓玲,刘晨宇,梁磊,等:单模传输约束下HCF低耦合损耗结构优化方法



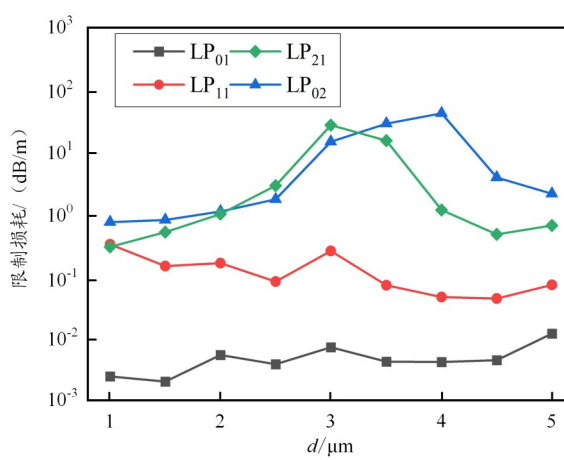
(a) 基模、高阶模和管模 n_{eff} 随 D_1/D 变化



(b) 基模、高阶模和管模 n_{eff} 随 d 变化趋势



(c) 基模、高阶模损耗随 D_1/D 变化趋势



(d) 基模、高阶模损耗随 d 变化趋势

图8 基模、管模与高阶模损耗及 n_{eff} 随结构参数 D_1/D 与 d 的演化

D_1/D 固定为 0.9, 并将优化重心从针对提升某一特定高阶模的损耗拓展至同时抑制多个关键高阶模。在 $D_1/D=0.9, N=7$ 的条件下, 本文以 $0.1 \mu\text{m}$ 为步长, 将 d 从 $0.5 \mu\text{m}$ 提高至 $1.5 \mu\text{m}$, 使管模能够同时对 LP_{11} 和 LP_{21} 模产生显著影响, 并在每一组结构参数下提取与基模损耗最接近的高阶模损耗, 计算得到高阶模抑制比 R 与 d 的关系, 如图 9 所示。可以看到, 在大多数结构条件下, R 均大于 100, 当 $d=0.9$ 时, $R>250$, 说明纤芯区域内高阶模已获得充分抑制。仅在 d 为 $0.8, 1.2 \mu\text{m}$ 附近, 由于基模损耗出现局部突增, 导致 R 低于 100, 但整体仍保持在远高于基模判据的水平。由此可知, 基于 $N=7$ 与 $D_1/D=0.9$ 的参数组合, 通过对 d 的精细调节, 不仅实现了 $R>50$ 的单模要求, 更能在宽参数范围内获得了 $R>100$ 的高阶模抑制裕度, 为上述耦合损耗优化提供了稳定的单模工作区间。

优化后的光纤参数如下: $N=7, t=360 \text{ nm}, 2a=30 \mu\text{m}$,

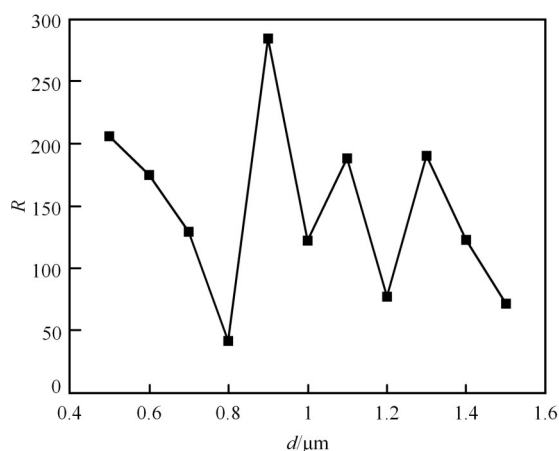


图9 高阶模抑制比 R 与 d 的关系

$D_1/D=0.9, d=0.9 \mu\text{m}$ 。在上述条件下能够获得最佳的高阶模抑制比 ($R>250$), 此时耦合损耗低至 0.069 dB , 相比 0.116 dB , 降幅超过 40%。说明优化后的结构参

数在保证光纤耦合损耗降低的同时,兼具光纤传输时的良好单模特性。

5 结束语

本文针对当前 SCF-HCF 耦合过程中两者的电场分布不匹配及相位不同步导致耦合损耗高的问题,围绕 SCF-GRIN 光纤-HCF 结构探讨单模传输约束下 HCF 低耦合结构优化方法。从模场重叠积分理论出发,将入射端 SCF 的模场通过引入 GRIN 光纤作为模场适配器与 HCF 耦合,同时创新性的开展 HCF 的结构优化工作,以 HCF 与 SCF 的电场分布匹配及相位同步为目标,降低 SCF-HCF 的耦合损耗。仿真结果表明,耦合损耗随着 N 、 d 和 D_{eff}/D 的增加而降低,当 $N=7$, $D_{\text{eff}}/D=0.9$, $d=0.9\ \mu\text{m}$ 时,SCF 与 HCF 之间的耦合损耗由 0.116 dB 降低至 0.069 dB,降幅超过 40%,高阶模抑制比 $R>250$,且在 $d=0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 的裕度范围内均保持 ($R>50$) 的单模特性,有效解决了 SCF 和 HCF 耦合损耗与单模性能难以兼顾的矛盾。然而,本文结果是基于单波长、理想对准与理想折射率分布下的数值分析,尚未充分考虑制备误差、弯曲与环境扰动等因素的影响,后续将结合实验制备与容差分析,对 SCF-GRIN 光纤-HCF 结构在高功率激光传输和工程互连场景中的性能与稳健性开展进一步验证。

参考文献:

- [1] Jasion G T, Sakr H, Hayes J R, et al. 0.174 dB/km hollow core double nested antiresonant nodeless fiber(DNANF)[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 6–10, 2022, San Diego, CA, USA. Piscataway: IEEE, 2022: 1–3.
- [2] Mulvad H C H, Abokhamis M S, Zuba V, et al. Kilowatt-average-power single-mode laser light transmission over kilometre-scale hollow-core fibre[J]. Nature Photonics, 2022, 16(6): 448–453.
- [3] Shi Bo, Zhang Cong, Kelly T, et al. Splicing hollow-core fiber with

童晓玲,刘晨宇,梁磊,等:单模传输约束下 HCF 低耦合损耗结构优化方法

- standard glass-core fiber with ultralow back-reflection and low coupling loss[J]. ACS Photonics, 2024, 11(8): 3288–3295.
- [4] Fan Xingjie, Wang Dawei, Cheng Julian, et al. Few-mode fiber coupling efficiency for free-space optical communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(6): 1823–1829.
 - [5] Zhong Ailing, Fokoua E N, Ding Meng, et al. Connecting hollow-core and standard single-mode fibers with perfect mode-field size adaptation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(6): 2124–2130.
 - [6] Wang Caoyuan, Yu Ruowei, Debord B, et al. Ultralow-loss fusion splicing between negative curvature hollow-core fibers and conventional SMFs with a reverse-tapering method[J]. Optics Express, 2021, 29(14): 22470–22478.
 - [7] Suslov D, Komanec M, Numkam F E R, et al. Low loss and high performance interconnection between standard single-mode fiber and anti-resonant hollow-core fiber[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 8799–8799-9.
 - [8] Suslov D, Numkam F E R, Dousek D, et al. Low loss and broadband low back-reflection interconnection between a hollow-core and standard single-mode fiber[J]. Optics Express, 2022, 30(20): 37006–37014.
 - [9] Zuba V, Mulvad H C H, SlaviK R, et al. Limits of coupling efficiency into hollow-core antiresonant fibres[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(19): 6374–6382.
 - [10] Zhang Zhe, Ding Wei, Jia Anqing, et al. Connector-style hollow-core fiber interconnections[J]. Optics Express, 2022, 30(9): 15149–15157.
 - [11] Sakr H, Bradley T D, Jasion G T, et al. Hollow core NANFs with five nested tubes and record low Loss at 850, 1060, 1300 and 1625nm[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021, June 6–11, 2021. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2021: 1–3.
 - [12] Shere W, Fokoua E N, Jasion G T, et al. Designing multi-mode antiresonant hollow-core fibers for industrial laser power delivery[J]. Optics Express, 2022, 30(22): 40425–40440.
 - [13] Wang Yingxin, Chang Wonkeun. Multi-nested antiresonant hollow-core fiber with ultralow loss and single-mode guidance[J]. Optics Express, 2023, 31(11): 18250–18264.
 - [14] Deng Anjun, Chang Wonkeun. Geometrical scaling of antiresonant hollow-core fibers for mid-infrared beam delivery[J]. Crystals, 2021, 11(4): 420–420-11.