

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 基于GIMF的空芯反谐振光纤与单模光纤低损耗熔接

马晓辉, 李楚晨, 宋超, 胡天豪, 赵中斌, 刘浩, 张维, 周勇, 方文坛, 陈小林, 黄松, 高伟清

#### 引用本文:

马晓辉, 李楚晨, 宋超, 等. 基于GIMF的空芯反谐振光纤与单模光纤低损耗熔接[J]. *光电工程*, 2025, 52(1): 240225.

Ma X H, Li C C, Song C, et al. Low-loss fusion splice of hollow-core anti-resonant fiber and single mode fiber based on GIMF[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(1): 240225.

<https://doi.org/10.12086/oe.2025.240225>

收稿日期: 2024-09-20; 修改日期: 2024-12-13; 录用日期: 2024-12-13

### 相关论文

#### Specialty optical fibers for advanced sensing applications

Huanhuan Liu, Dora Juan Juan Hu, Qizhen Sun, Lei Wei, Kaiwei Li, Changrui Liao, Bozhe Li, Cong Zhao, Xinyong Dong, Yuhan Tang, Yihong Xiao, Gerd Keiser, Perry Ping Shum

*Opto-Electronic Science* 2023, 2(2): 220025 doi: 10.29026/oes.2023.220025

#### Optical micro/nanofiber enabled tactile sensors and soft actuators: A review

Lei Zhang, Yuqi Zhen, Limin Tong

*Opto-Electronic Science* 2024, 3(8): 240005 doi: 10.29026/oes.2024.240005

#### Seeing at a distance with multicore fibers

Haogong Feng, Xi Chen, Runze Zhu, Yifeng Xiong, Ye Chen, Yanqing Lu, Fei Xu

*Opto-Electronic Advances* 2024, 7(7): 230202 doi: 10.29026/oea.2024.230202

#### TiCN作为可饱和吸收体的2.8 $\mu\text{m}$ 被动调Q锁模光纤激光器

叶珊珊, 黄海波, 陈颂元, 陶俊哲, 文字轩, 高伟清

*光电工程* 2023, 50(7): 230107 doi: 10.12086/oe.2023.230107

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



OE\_Journal

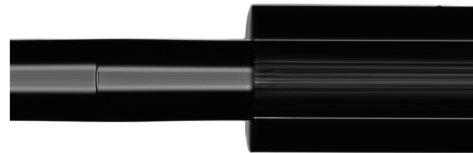


Website

DOI: 10.12086/oe.2025.240225

CSTR: 32245.14.oe.2025.240225

## 基于 GIMF 的空芯反谐振光纤 与单模光纤低损耗熔接



马晓辉, 李楚晨, 宋超, 胡天豪,  
赵中斌, 刘浩, 张维, 周勇,  
方文坛, 陈小林, 黄松, 高伟清\*

合肥工业大学物理学院光学工程系, 安徽合肥 230601

**摘要:** 本文提出了一种引入渐变折射率多模光纤作为过渡光纤的嵌套空芯反谐振光纤与单模光纤的低损耗熔接方法。使用渐变折射率多模光纤作为模场适配光纤, 利用其自成像效应扩大单模光纤中的模场, 实现了嵌套空芯反谐振光纤与单模光纤的模场匹配。实验中探究了熔接时放电时间和放电功率对熔接损耗的影响。基于优化后的熔接方案, 有效保护了嵌套空芯反谐振光纤熔接端面微结构的完整性, 平均熔接损耗低至 0.60 dB。实验结果对提高嵌套空芯反谐振光纤与现有光纤体系的兼容性提供了参考。

**关键词:** 空芯反谐振光纤; 嵌套结构; 模场匹配; 渐变折射率光纤; 单模光纤; 熔接

中图分类号: TN253

文献标志码: A

马晓辉, 李楚晨, 宋超, 等. 基于 GIMF 的空芯反谐振光纤与单模光纤低损耗熔接 [J]. 光电工程, 2025, 52(1): 240225

Ma X H, Li C C, Song C, et al. Low-loss fusion splice of hollow-core anti-resonant fiber and single mode fiber based on GIMF[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(1): 240225

## Low-loss fusion splice of hollow-core anti-resonant fiber and single mode fiber based on GIMF

Ma Xiaohui, Li Chuchen, Song Chao, Hu Tianhao, Zhao Zhongbin, Liu Hao,  
Zhang Wei, Zhou Yong, Fang Wentan, Chen Xiaolin, Huang Song, Gao Weiqing\*

Department of Optical Engineering, School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China

**Abstract:** This paper presents a low-loss fusion splice method between the nested hollow-core anti-resonant fiber (HC-ARF) and single-mode fiber (SMF) by introducing a graded-index multi-mode fiber (GIMF) as a transition fiber. The mode field matching between the nested HC-ARF and the SMF is achieved by using the GIMF as the mode field adapting fiber and expanding the mode field in the SMF by using its self-imaging effect. The effects of discharge time and discharge power on fusion splice loss during fusion splicing are explored in the experiments. Based on an optimized fusion splicing scheme, the integrity of the microstructure of the nested HC-ARF fusion splicing end face is effectively protected, and the average fusion splicing loss is as low as 0.60 dB. The

收稿日期: 2024-09-20; 修回日期: 2024-12-13; 录用日期: 2024-12-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB2903102); 国家自然科学基金资助项目 (62105087, 62105088, 12204141, 12304476); 中央高校基本业务经费 (JZ2024HGTTB0235, JZ2024HGTTB0212, JZ2024HGTTB0202)

\*通信作者: 高伟清, gaoweiqing@hfut.edu.cn。

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

experimental results provide a reference to improve the compatibility of the nested hollow-core anti-resonant fibers with the existing fiber system.

**Keywords:** hollow-core anti-resonant fiber; nested structure; mode field match; graded-index fiber; single mode fiber; fusion splicing

## 1 引言

空芯光子晶体光纤 (Hollow-core photonic crystal fiber, HC-PCF) 是一种在空气中导光的光纤, 依据导光机制的不同, HC-PCF 分为光子带隙型光纤 (hollow-core photonic bandgap fibers, HC-PBGF) 和反谐振型光纤 (hollow-core anti-resonant fiber, HC-ARF)。由于是在空气纤芯中导光, HC-PCF 较石英光纤有着更低的色散、非线性和瑞利散射, 以及更高的传播速度和损伤阈值<sup>[1-3]</sup>。并且 HC-ARF 较 HC-PBGF 具有更低的传输损耗。嵌套 HC-ARF 是一种有多层反谐振结构的空芯光纤, 可以有效降低光的泄漏, 极限理论传输损耗可低至 0.1 dB/km<sup>[2-4]</sup>。因此嵌套 HC-ARF 在光纤传感、高功率传输、气体激光器、中红外激光等诸多领域中都有着重要的应用价值<sup>[5-12]</sup>。

鉴于实芯单模光纤 (single mode fiber, SMF) 在现有光纤系统中仍占据主导地位, 为了实现嵌套 HC-ARF 与现有光纤系统的兼容, 有必要解决嵌套 HC-ARF 与 SMF 之间的低损耗熔接问题。嵌套 HC-ARF 与 SMF 之间的连接损耗主要来源于模场失配、HC-ARF 熔接端面微结构坍塌以及两光纤的几何偏移<sup>[13]</sup>。

近年来, SMF 和 HCF 的互连方法主要有基于胶水粘合的光纤阵列连接<sup>[14]</sup>、连接器连接<sup>[15]</sup>和光纤阵列熔接<sup>[16-23]</sup>。光纤连接器可以增加抗反射涂层和实现低损耗连接, 但是不能提供密封连接, 会对 HCF 的性能有所影响, 有关其长期稳定性的研究尚未见报道。

光纤阵列连接技术是在 SMF 与 HCF 之间加一段过渡光纤, 用于匹配两者的模场。2014 年, Gao 等人<sup>[16]</sup>通过引入一段高归一化频率的过渡光纤, 将 HC-PBGF 与 SMF 的熔接损耗降到了 0.73 dB, 该工作为 HC-ARF 的光纤阵列连接提供了思路。2017 年, 张乃千等人<sup>[22]</sup>提出了一种基于拉锥光纤实现模场匹配的方案, 通过对 SMF 拉锥与 Ice-cream 型 HC-ARF 光纤耦合, 耦合效率高达 96.05%, 但是该方案操作复杂且容易损伤光纤。2018 年, 李晓倩等人<sup>[23]</sup>通过引入一段实芯大模场光纤进行模场匹配, 实现了从 SMF 到 HC-ARF 的熔接损耗为 0.844 dB, 但该方案中热扩

芯操作时间较长。2021 年, Suslov 等人<sup>[14]</sup>提出了使用渐变折射率多模光纤 (graded-index multi-mode fiber, GIMF) 作为模场匹配的光纤, 利用 GIMF 的自成像效应 (self-imaging) 对光扩束并准直, 得到 SMF 与 HC-ARF 之间的连接损耗为 0.15 dB; 2023 年, Zhong 等人<sup>[20]</sup>选择不同型号和不同长度的 GIMF 给不同纤芯尺寸的 HC-ARF 进行模场匹配, 利用胶水连接使最小损耗低至 0.079 dB。但是这两个工作中的光纤之间是使用胶水粘合的冷连接, 长期稳定性和抗环境干扰性难以保证。

为了实现 HC-ARF 与 SMF 的低损耗熔接, 本工作引入了能精确控制长度的 GIMF 作为模场匹配光纤, 实现 SMF-GIMF-(HC-ARF)-GIMF-SMF 构型的整体熔接损耗低至 1.19 dB, 平均单侧熔接损耗为 0.60 dB。

## 2 基本原理

### 2.1 熔接损耗形成机理

嵌套 HC-ARF 与 SMF 之间的熔接损耗来源主要有 HC-ARF 熔接端面微结构坍塌、两类光纤的模场失配、光纤对准时的几何偏移和光纤端面的平整度<sup>[13]</sup>。

在电极放电的熔接机中, 其熔接过程是先进行预放电软化光纤端面, 然后推进光纤使两根光纤初步融合再进行主放电。由于电极放电的能量是由外至内进入光纤的, 如果直接使用实芯光纤的熔接程序, 主放电程序的放电时间过长, HC-ARF 的端面融化引起微结构坍塌, 从而破坏反谐振的波导结构, 提高了熔接损耗。为了避免这种情况, 通过调整熔接程序的预放电和主放电时间与功率, 采用高功率短时间放电模式可有效避免 HC-ARF 的微结构破坏, 从而降低损耗。

SMF 和 HC-ARF 的模场失配损耗<sup>[24]</sup>可以用以下公式来计算:

$$N_{\text{loss}} = -20 \lg \left( \frac{2d_1d_2}{d_1^2 + d_2^2} \right), \quad (1)$$

式中:  $d_1$  和  $d_2$  分别是两种光纤的模场直径。由式 (1) 知, 只有两种光纤模场直径相近时, 模场失配损耗才会较低。对于 SMF 和 HC-ARF 的熔接, 二者的模场直径并不相同, 甚至差距较大, 因此需要加入一

段过渡光纤以达成两种光纤的模场匹配。

### 2.2 渐变折射率光纤自成像效应

从 SMF 传播到 GIMF 中的光信号会沿着 GIMF 呈正弦型周期变化放大和缩小模场直径, 是渐变折射率多模光纤的自成像效应<sup>[25]</sup>, 其中一个周期称为一个间距 (pitch), 如图 1(a) 所示。可以根据自成像特性, 准确地切割控制 GIMF 的长度, 从而获得所需要的模场直径。当光在 GIMF 中传播到 1/4 间距时, 其模场直径达到最大并且输出光束是准直的<sup>[14]</sup>。

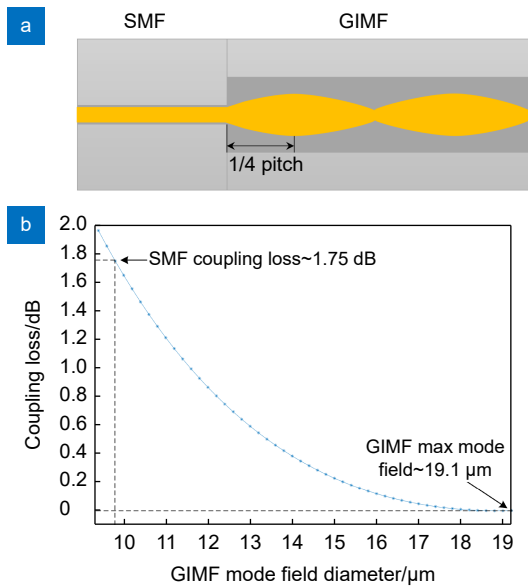


图 1 GIMF 的模场匹配。(a) GIMF 的自成像效应; (b) 通过 GIMF 放大模场后与 HC-ARF 的模场失配损耗  
Fig. 1 GIMF's mode field matching. (a) Self-imaging effect of GIMF; (b) Mode field mismatch loss between the GIMF amplified mode field and HC-ARF

本工作使用的 HC-ARF 的空气纤芯直径约为 27 μm, 用纤芯尺寸的 70% 来估算, 得到其基模的模场直径为 18.9 μm<sup>[26]</sup>。对应的, 选择的 GIMF 的型号是 OM1, 在 1/4 间距处的最大模场直径约为 19.1 μm<sup>[14]</sup>, SMF 的模场直径约为 9.8 μm。根据式 (1) 计算得到的 GIMF 放大后不同模场直径与 HC-ARF 的耦合损耗如图 1(b) 所示, SMF 与 HC-ARF 的耦合损耗为 1.75 dB, 而经过 OM1 放大后的最大模场直径与 HC-ARF 的模场直径十分接近, 耦合损耗很低。

### 3 嵌套反谐振光纤与单模光纤的熔接

熔接使用五嵌套管反谐振结构的 HC-ARF, 该结构中每组嵌套管都单独附着在包层内缘上, 两组嵌套

管之间的空腔用于损耗高阶模式以保证纤芯内的基模传输<sup>[2]</sup>, 其截面如图 2(a) 所示, 中间空气纤芯直径约为 27 μm, 包层直径为 230 μm。GIMF (OM1) 纤芯为 62.5 μm, 包层直径为 125 μm。SMF (G652D) 纤芯直径为 10 μm, 包层直径为 125 μm。在实际熔接过程中, SMF 与 HC-ARF 直接熔接 (HC-ARF 的微结构完整未变形坍塌) 的损耗甚至会超过 3 dB。

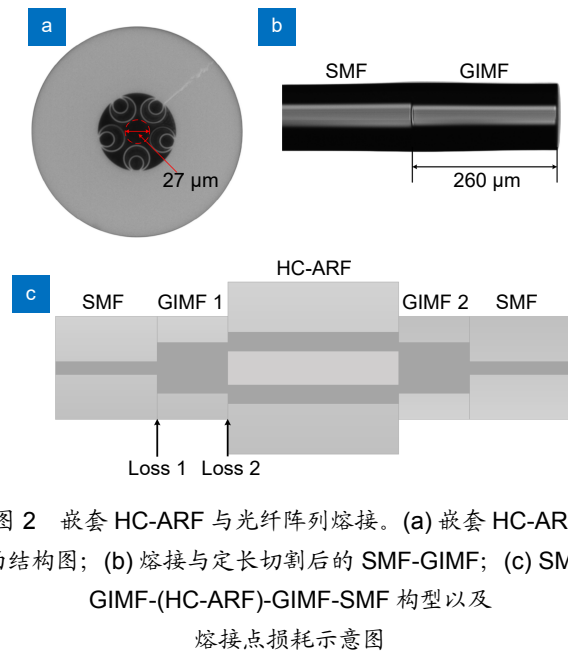


图 2 嵌套 HC-ARF 与光纤阵列熔接。(a) 嵌套 HC-ARF 端面结构图; (b) 熔接与定长切割后的 SMF-GIMF; (c) SMF-GIMF-(HC-ARF)-GIMF-SMF 构型以及熔接点损耗示意图  
Fig. 2 Nested HC-ARF and fiber arrays fusion splice. (a) Nested HC-ARF end face structure diagram; (b) SMF-GIMF after fusion splice and fixed length cleave; (c) SMF-GIMF-(HC-ARF)-GIMF-SMF configuration and diagram of fusion splice point loss

熔接第一步: 用普通的商业熔接机 (FUJIKURA 61S) 将 SMF 与 GIMF 光纤以多模光纤熔接模式熔接, 然后把光纤转移到 Vytran 多功能光纤熔接工作站上, 调整程序用于定长切割, 误差可以控制在 10 μm 内。切割的 GIMF 光纤端面平整角度较小。对选定的 OM1 光纤, 应该切割约 260 μm 的长度以扩大模场直径。切割后的 SMF-GIMF 如图 2(b) 所示, 该熔接点的损耗是 0.02 dB。其中, 用于测量损耗的光源是 C+L 波段的自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 光源, 波长为 1520~1620 nm, 输出功率为 13.30 dBm。通过光功率计测量功率。如图 2(c) 所示, 在熔接前测 ASE 光源尾纤 SMF 的光功率  $P_1$ , 在熔接与定长切割 GIMF 后测得光功率  $P_2$ , 由此可计算出  $Loss_1$ ; GIMF 与 HC-ARF 熔接后测得光功率  $P_3$ , 由  $P_2$  和  $P_3$  可计算出  $Loss_2$ 。

熔接第二步: 将扩大模场后的 GIMF 与 HC-ARF

的熔接。首先是使用 Vytran LDC401 切割机切割 HC-ARF。由于 HC-ARF 是中空的，切割时拉力设置应该比同尺寸实芯光纤要小，实验中选择使用 70% 的同尺寸实芯光纤拉力进行切割，切割得到的端面平整角度较小。熔接使用的 HC-ARF 长度为 2 m，使用的熔接机为 FUJIKURA FSM100P+。将第一步中熔接切割好的 SMF-GIMF 的一段连接测试光源，另一端与切割平整端面的 HC-ARF 放在熔接机夹具上，使用正确尺寸的夹具对熔接机的光纤对准是有利的，否则可能会带来几何偏移损耗。对 HC-ARF 的另一端也进行切割，得到平整端面后对准光功率计探头，可以实时检测耦合后的功率。熔接过程中端面的角度对熔接损耗影响较大，在切割 SMF-GIMF 与 HC-ARF 时，需要控制切割的角度小于  $0.5^\circ$ 。在实验中以相同的熔接参数将不同角度的 SMF-GIMF 与 HC-ARF 熔接，测得的单端损耗如表 1 所示。表 1 中的光纤角度是利用 FSM100P+ 读取判断的，光纤角度越大，熔接损耗越高。在实验过程中，每次切割的 GIMF 长度不同也会带来一定的误差。

在实验中探究了熔接放电强度、放电时间对熔接损耗的影响。在控制 GIMF 的长度和光纤端面角度的情况下，改变放电时间和放电强度分别对 SMF-GIMF-

(HC-ARF) 单侧熔接损耗的影响如图 3(a) 和图 3(b) 所示。图中的放电时间和放电强度已归一化。在图 3(a) 中，HC-ARF 的端面图是在对应放电时间熔接后将光纤拉断观察得到的。随着放电时间的增加，熔接损耗急剧增大，当放电时间为 1.6 与 1.8 时，HC-ARF 内嵌套环变形严重，损耗也在 1 dB 以上。在图 3(b) 中，随着放电强度的增加，熔接损耗也随之增大。放电强度如果低于 1，虽然不会提高熔接损耗，但是熔接点的强度会降低。在熔接时，应该在保证嵌套 HC-ARF 端面微结构完整的同时，尽可能提高熔接强度，熔接参数应该选择图 3 中较高的放电功率与较短的放电时间。

熔接机的熔接程序基于以上实验结果调整，改变了主放电功率和放电时间，熔接时可以有效保护 HC-ARF 中空微结构，同时有较高的熔接强度。熔接完成后使用熔接机上的 ARC 功能，重复放电数次，增加熔接强度。图 4(a) 为熔接后的光纤图像，图 4(c) 和图 4(d) 为 HC-ARF 内部坍塌的图像，对比之下可以观察到图 4(a) 中 HC-ARF 并未有变形，此时从光功率计计算测得 GIMF1-(HC-ARF) 的损耗为 0.43 dB。将熔接后的光纤熔接点拉断，观察此时 HC-ARF 的端面如图 4(b) 所示，将其与图 4(d) 和图 2(a) 进行对比

表 1 不同角度熔接测试的熔接损耗

Table 1 Loss from different angle fusion splice tests

Sample	GIMF length/ $\mu\text{m}$	GIMF angle/ $^\circ$	HC-ARF angle/ $^\circ$	Loss/dB
1	268	0.7	0.2	0.56
2	270	1.0	0.8	1.27
3	272	1.1	0.1	0.74
4	268	1.2	0.1	0.80
5	267	1.3	0.2	0.73
6	270	1.5	0.1	0.70
7	270	2.1	0.3	0.99

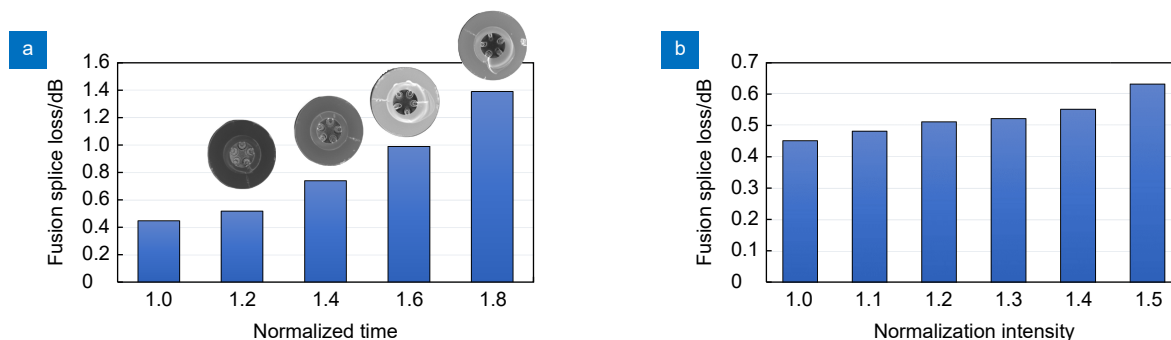


图 3 不同熔接参数对损耗的影响。(a) 放电时间对熔接损耗的影响；(b) 放电强度对熔接损耗的影响

Fig. 3 Influence of different fusion splice parameters on loss. (a) Influence of discharge time on fusion splice loss; (b) Influence of discharge intensity on fusion splice loss

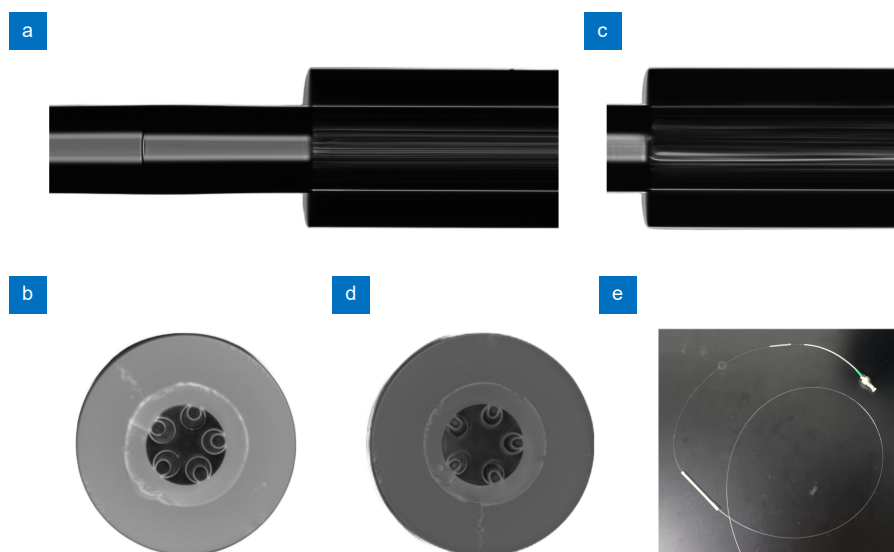


图 4 熔接结果。(a) 熔接后的 SMF-GIMF-(HC-ARF) 光纤; (b) 拉断熔接点后的 HC-ARF 端面; (c) HC-ARF 变形坍塌侧面; (d) HC-ARF 变形的端面; (e) 用热缩套管保护的光纤

Fig. 4 Result of fusion splice. (a) SMF-GIMF-(HC-ARF) after fusion splice; (b) HC-ARF end face after breaking the fusion splice point; (c) Side view of HC-ARF collapse; (d) End face of HC-ARF collapse; (e) Fiber protected by heat shrink tubing

表 2 多次熔接测试的熔接损耗

Table 2 Loss from multiple fusion splice tests

Sample	GIMF1 length/ $\mu\text{m}$	GIMF1 loss/dB	GIMF2 length/ $\mu\text{m}$	GIMF2 loss/dB	Total loss/dB
1	290	0.93	272	0.95	1.88
2	267	0.44	276	1.05	1.49
3	265	0.47	268	0.75	1.22
4	267	0.45	265	0.74	1.19

可知, 其内部结构完整, 无变形坍塌现象。如图 4(e) 所示, 熔接完成后可以给光纤熔接点加上热缩套管, 以提高这段光纤的机械强度, 防止断裂且对损耗无影响。

熔接第三步: 重复第一步和第二步。熔接得到 SMF-GIMF-(HC-ARF)-GIMF-SMF 完整构型, 两端 SMF 分别连接光源与光功率计, 测得的整体损耗为 1.19 dB。多次实验熔接测得的数据如表 2 所示, 从 SMF 到 HC-ARF 的损耗 (GIMF1 loss) 比从 HC-ARF 到 SMF 的损耗 (Total loss-GIMF1 loss) 低, 这可能是因为 SMF 端面的菲涅尔反射。从表 2 可以知道 GIMF 光纤的长度对损耗的影响较大, 最佳的 GIMF 光纤长度应该是 260~270  $\mu\text{m}$ , 如果继续优化 GIMF 的切割误差, 可以更加稳定地获得低损耗的熔接结果。

## 4 结 论

本工作对嵌套结构 HC-ARF 与 SMF 的低损耗熔接方案进行了探索。通过引入一段长度为 260  $\mu\text{m}$  的

GIMF 作为过渡光纤对 SMF 的模场进行扩大, 实现 SMF 与 HC-ARF 的模场匹配以降低耦合损耗。探究了熔接放电强度、放电时间对熔接损耗的影响。通过编辑光纤熔接机的程序改变熔接策略, 防止熔接时嵌套 HC-ARF 的微结构变形坍塌, 实现了 SMF-GIMF-(HC-ARF) 的低损耗熔接。测得 SMF 到 HC-ARF 的平均单侧损耗为 0.60 dB, 表明 SMF 中的基模光有效耦合至 HC-ARF 中。该工作对提高 HC-ARF 与现有光纤体系的兼容性提供了有益指导, 可作为 HC-ARF 的发展与应用的技术基础。

## 参考文献

- [1] Roberts P J, Couny F, Sabert H, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Opt Express*, 2005, 13(1): 236-244.
- [2] 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), San Diego, 2022: 1-3.
- [3] Li P, Chen W. Opportunity and challenge for hollow core anti resonant optical fiber in the long-distance telecommunication[J]. *Study Opt Commun*, 2023(2): 1-8, 44.

- 李萍, 陈伟. 空芯反谐振光纤长距离通信的机遇与挑战[J]. *光通信研究*, 2023(2): 1–8, 44.
- [4] Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(20): 23807–23828.
- [5] Perevoschikov S, Kaydanov N, Ermatov T, et al. Light guidance up to 6.5  $\mu\text{m}$  in borosilicate soft glass hollow-core microstructured optical waveguides[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(19): 27940–27950.
- [6] Peng X, Mielke M, Booth T. High average power, high energy 1.55  $\mu\text{m}$  ultra-short pulse laser beam delivery using large mode area hollow core photonic band-gap fiber[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(2): 923–932.
- [7] Zhang B, Gu S, Lian Z G, et al. The characteristics and fiber test of micro-structure hollow core fiber and its engineering application[J]. *Study Opt Commun*, 2023(2): 9–18, 68. 张博, 顾帅, 廉正刚, 等. 微结构空芯光纤特性及光纤测试和工程应用[J]. *光通信研究*, 2023(2): 9–18, 68.
- [8] Sollapur R, Kartashov D, Zürich M, et al. Resonance-enhanced multi-octave supercontinuum generation in antiresonant hollow-core fibers[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(12): e17124.
- [9] Wang Y Z, Dasa M K, Adamu A I, et al. High pulse energy and quantum efficiency mid-infrared gas Raman fiber laser targeting  $\text{CO}_2$  absorption at 4.2  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Letters*, 2020, **45**(7): 1938–1941.
- [10] Chen T H, Yu J, Zhu X S, et al. Characterization of gas sensing system with gradually tapered flexible hollow waveguides as absorption cell[J]. *Study Opt Commun*, 2017(2): 36–39. 陈天航, 于晶, 朱晓松, 等. 渐变型柔性空芯光纤吸收腔的气体传感特性[J]. *光通信研究*, 2017(2): 36–39.
- [11] Zhao P C, Zhao Y, Bao H H, et al. Mode-phase-difference photothermal spectroscopy for gas detection with an anti-resonant hollow-core optical fiber[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 847.
- [12] Wang Z F, Belardi W, Yu F, et al. Efficient diode-pumped mid-infrared emission from acetylene-filled hollow-core fiber[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(18): 21872–21878.
- [13] Xiao L M, Demokan M S, Jin W, et al. Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect[J]. *J Lightwave Technol*, 2007, **25**(11): 3563–3574.
- [14] Suslov D, Komanec M, Fokoua E R N, et al. Low loss and high performance interconnection between standard single-mode fiber and antiresonant hollow-core fiber[J]. *Sci Rep*, 2021, **11**(1): 8799.
- [15] Zhang Z, Jia A Q, Hong Y F, et al. Ultralow-loss, plug-and-play hollow-core fiber interconnection[C]//2022 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, San Diego, 2022: 1–3.
- [16] Gao S F, Wang Y Y, Tian C P, et al. Splice loss optimization of a photonic bandgap fiber via a high V-number fiber[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2014, **26**(21): 2134–2137.
- [17] Wang C Y, Yu R W, Xiao L M. Low-loss fusion splicing between antiresonant-HCFs and AR-coated SMFs with low return loss[C]//2022 *Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, Shenzhen, 2022: 280–282. <https://doi.org/10.1109/ACP55869.2022.10089113>.
- [18] Zhang C, Fokoua E N, Fu S N, et al. Low loss and back-reflection interconnection between SMF and hollow core fiber by angled fusion splicing[C]//2022 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, 2022: 1–2.
- [19] Shi B, Zhang C, Fokoua E R N, et al. Towards spliced SMF to hollow core fiber connection with low loss and low back-reflection[C]//2023 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, 2023: 1–2.
- [20] Zhong A L, Fokoua E N, Ding M, et al. Connecting hollow-core and standard single-mode fibers with perfect mode-field size adaptation[J]. *J Lightwave Technol*, 2024, **42**(6): 2124–2130.
- [21] Komanec M, Suslov D, Zvanovec S, et al. Low-loss and low-back-reflection hollow-core to standard fiber interconnection[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2019, **31**(10): 723–726.
- [22] Zhang N Q, Qin T L, Wang Z F, et al. Low-loss coupling between tapered fibers and anti-resonant hollow-core photonic crystal fibers[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2017, **54**(10): 100608. 张乃千, 秦天令, 王泽锋, 等. 反共振空芯光子晶体光纤与拉锥光纤低损耗耦合[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, **54**(10): 100608.
- [23] Li X Q, Gao S F, Wang Y Y, et al. Low-loss fusion splice of hollow-core anti-resonant fiber and single mode fiber[J]. *Acta Opt Sin*, 2018, **38**(10): 1006002. 李晓倩, 高寿飞, 汪滢莹, 等. 空芯反谐振光纤与单模光纤的低损耗熔接研究[J]. *光学学报*, 2018, **38**(10): 1006002.
- [24] Marcuse D. Loss analysis of single-mode fiber splices[J]. *Bell Syst Tech J*, 1977, **56**(5): 703–718.
- [25] Hofmann P, Mafi A, Jollivet C, et al. Detailed investigation of mode-field adapters utilizing multimode-interference in graded index fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, **30**(14): 2289–2298.
- [26] Zuba V, Mulvad H C H, Slavik R, et al. Limits of coupling efficiency into hollow-core antiresonant fibres[J]. *J Lightwave Technol*, 2023, **41**(19): 6374–6382.

## 作者简介



马晓辉(1992-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤激光与非线性的研究。

E-mail: [mxhui@hfut.edu.cn](mailto:mxhui@hfut.edu.cn)



【通信作者】高伟清(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤器件与系统、光电子集成器件、光纤非线性效应等方面的研究工作。主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金项目、安徽省重点研究与开发计划、中央高校业务费项目、中央高校改善基本办学条件专项等。

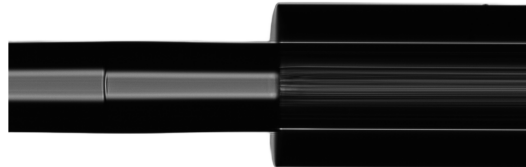
E-mail: [gaoweiqing@hfut.edu.cn](mailto:gaoweiqing@hfut.edu.cn)



扫描二维码, 获取PDF全文

# Low-loss fusion splice of hollow-core anti-resonant fiber and single mode fiber based on GIMF

Ma Xiaohui, Li Chuchen, Song Chao, Hu Tianhao, Zhao Zhongbin, Liu Hao, Zhang Wei, Zhou Yong, Fang Wentan, Chen Xiaolin, Huang Song, Gao Weiqing\*



SMF-GRIN-HCARF after fusion splice

**Overview:** Hollow core anti-resonant fiber (HC-ARF) is a type of fiber with a novel optical guiding mechanism. Compared with traditional single-mode fiber (SMF), HC-ARF has the advantages of lower dispersion, nonlinearities, Rayleigh scattering, higher propagation speed, and damage threshold. It has great potential applications in fiber sensing, high-power transmission, gas laser, mid-infrared laser, and other fields. In recent years, the interconnection methods between SMF and HCF mainly include fiber array connection based on adhesive bonding, connector connection, and fiber array fusion splicing. However, these methods all have certain limitations, such as complex operations and insufficient stability. To address these issues, we introduced a precisely controlled length graded-index multi-mode fiber (GIMF) as a transition fiber in the fusion splicing of HC-ARF and SMF, achieving mode field matching between HC-ARF and SMF.

The main sources of fusion losses between HC-ARF and SMF include microstructure collapse of the fusion end face of HC-ARF, mode field mismatch between the two fibers, geometric offset during fiber alignment, and flatness of the fiber end face. The mode field mismatch loss between HC-ARF and SMF is due to their different mode field diameters. For the fusion splicing of HC-ARF and SMF, a transition fiber needs to be added to achieve mode field matching between the two fibers.

The HC-ARF used for fusion splicing is an anti-resonant structure with five nested tubes. The loss of direct fusion splicing between SMF and HC-ARF (with the intact microstructure of HC-ARF) can even exceed 3 dB. Use a regular fiber fusion splicer to fuse SMF and GIMF in multimode fiber fusion mode, and then precisely control the length of 260  $\mu\text{m}$  cutting. The effects of discharge time and discharge power on fusion splicing loss during fusion splicing were also investigated in the experiment. The fusion splicing strength should be maximized while ensuring the integrity of the microstructure of the nested HC-ARF end faces during fusion splicing. A C+L band amplified spontaneous emission (ASE) light source with a wavelength of 1520-1620 nm is used to measure losses. The measured overall loss is 1.19 dB. The results of multiple fusion splicing experiments indicate that the length of GIMF fiber has a significant impact on the loss. The optimal length of GIMF fiber should be around 260-270  $\mu\text{m}$ . If the cutting error of GIMF is further optimized, low-loss fusion splicing results can be obtained more stably. This work provides useful guidance for improving the compatibility between HC-ARF and existing fiber optic systems, and can serve as the technical foundation for the development and application of HC-ARF.

Ma X H, Li C C, Song C, et al. Low-loss fusion splice of hollow-core anti-resonant fiber and single mode fiber based on GIMF[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(1): 240225; DOI: [10.12086/oe.2025.240225](https://doi.org/10.12086/oe.2025.240225)

Foundation item: Nation Key R&D Program of China (2022YFB2903102), National Natural Science Foundation of China (62105087, 62105088, 12204141, 12304476), and Central University Basic Research Fund Project (JZ2024HGTD0235, JZ2024HGTD0212, JZ2024HGTD0202)

Department of Optical Engineering, School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China

\* E-mail: [gaoweiqing@hfut.edu.cn](mailto:gaoweiqing@hfut.edu.cn)