

引用本文: 陈书玉, 杨世泰, 汪杰君, 等. 模场直径可调的光纤微准直器[J]. 光子通信技术, 2024, 48(4): 42–46.

模场直径可调的光纤微准直器

陈书玉¹, 杨世泰^{2,3}, 汪杰君^{1*}, 苑立波^{2*}

(1. 桂林电子科技大学北海校区 海洋工程学院, 广西 北海 536000; 2. 桂林电子科技大学 光学工程学院, 广西 桂林 541000;
3. 桂林电子科技大学 机械工程博士后流动站, 广西 桂林 541000)

摘要: 针对传统光纤准直器的输出模场直径单一问题, 提出了一种模场直径可调的光纤微准直器, 将单模光纤与不同的 2 段多模光纤组合, 形成“三明治”结构; 通过调整中间段光纤的长度, 实现模场直径的任意可调, 并构建了仿真实验模型, 制备了多个尺寸不同的光纤微准直器样品。实验结果表明: 该结构在 1 550 nm 波段下, 能实现输出模场直径在 20~40 μm 范围内的可调性。该光纤准直器制备方法简便、结构紧凑, 并能根据需求灵活调整光场的模场直径, 以适应不同的应用场景。

关键词: 光纤准直器; 光纤器件; 模场直径

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0042-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Optical fiber micro-collimator with adjustable mode field diameter

CHENG Shuyu¹, YANG Shitai^{2,3}, WANG Jiejun^{1*}, YUAN Libo^{2*}

(1. School of Marine Engineering, Guilin University of Electronic Science and Technology Beihai Campus, Beihai Guangxi 536000, China;
2. School of Optical Engineering, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin Guangxi 541000, China; 3. Postdoctoral
Research Center of Mechanical Engineering, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin Guangxi 541000, China)

Abstract: A fiber micro collimator with adjustable mode field diameter is proposed to address the problem of single output mode field diameter in traditional fiber collimators. The single mode fiber is combined with different 2-segment multimode fibers to form a "sandwich" structure. By adjusting the length of the middle section of the optical fiber, the mode field diameter can be adjusted arbitrarily, and a simulation experimental model has been constructed to prepare multiple fiber micro collimator samples with different sizes. The experimental results show that the structure can achieve adjustability of the output mode field diameter in the range of 20~40 μm in the 1 550 nm wavelength band. The preparation method of this fiber collimator is simple, compact in structure, and can flexibly adjust the mode field diameter of the light field according to the needs to adapt to different application scenarios.

Key words: optical fiber collimator, optical fiber device, mold field diameter

0 引言

在光通信领域, 光纤准直器是一种常用的光无源

收稿日期: 2024-04-02。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U23A20373)资助; 桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2023YCX248)资助。

作者简介: 陈书玉(1999—), 女, 硕士研究生, 现就读于桂林电子科技大学海洋工程学院机械专业, 主要研究方向为光纤集成器件。参与了基于微结构光纤的集成器件研究、新型传感光纤与器件技术开发及产业化应用项目。

*** 通信作者 1:** 汪杰君(1974—), 男, 博士, 桂林电子科技大学副教授, 主要研究方向为光电测试、计算机辅助测试。

*** 通信作者 2:** 苑立波(1962—), 男, 博士, 桂林电子科技大学教授, 主要研究方向为特种光纤及器件的设计、制作与应用。



器件, 被广泛应用于光环行器、光开关、光纤旋转连接器以及波分复用器等光学器件中。常规的光无源器件是由一个或一对准直器加上其它器件组成的, 对输入进器件的光束进行准直, 或对输出的光束进行聚焦接收, 以提高耦合效率^[1]。传统的光纤准直器一般为单模尾纤和准直透镜(C-Lens 或 G-Lens)的结构, 由于 C-Lens 结构的光纤准直器的最大工作距离与其曲率半径成正比, 故选择曲率半径较大的 C-Lens 能够获得更长的工作距离^[2]; 而 G-Lens 结构的光纤准直器的工作距离取决于轴心折射率、透镜长度和透镜聚焦系数, 适用于较短的工作距离^[3]。因此, 微结构的集成系统通常选择 G-Lens 作为准直透镜^[4-9]。但是, 传统的连接准直透镜所能达到的扩束效果有限, 输出模场直径

单一,且器件体积较大。为克服上述不足,本文提出一种模场直径可调的光纤微准直器。

1 光纤准直器的结构与仿真

本文提出的模场直径可调的光纤微准直器的设计结构主要有单模光纤(SMF)、阶跃折射率多模光纤(SIF)和渐变折射率多模光纤(GIF),分别从左至右依次连接,形成“三明治”结构,光纤准直器的光纤折射率分布及结构示意图如图1所示。

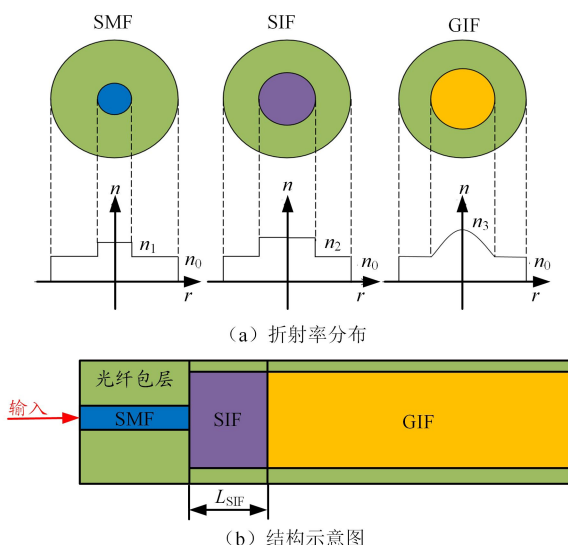


图1 光纤准直器光纤折射率分布及结构示意图

在 GIF 参数恒定的条件下,准直器最终输出光束的模场直径取决于 SIF 输入到 GIF 的模场大小。通过调整 SIF 的长度 L_{SIF} , 可以获取不同尺寸的输出模场直径。

本文根据光纤准直器的设计结构,使用 SMF 构建光学仿真模型,并利用光束传播法仿真 SMF 在各种不同多模光纤中的传输光路,从而更直观地看到光束在光纤中的传播路径,并对不同情况下的传播特性进行对比分析。仿真模型的光纤折射率分布如图2所示。可以看出,SMF 及 SIF 为阶跃型,GIF 折射率中心最高,沿径向递减。

在仿真实验中,SMF 的包层直径为 $125\ \mu\text{m}$,纤芯直径为 $9\ \mu\text{m}$,光纤包层折射率 $n_0=1.457$,纤芯折射率 $n_1=1.462$;此外,该 SMF 主要用于提供高斯光束及基模模场。SIF 的包层直径为 $125\ \mu\text{m}$,纤芯直径为 $105\ \mu\text{m}$,光纤包层折射率 $n_0=1.457$,纤芯折射率 $n_2=1.5$;GIF 纤芯的折射率分布遵循平方分布律^[10],其表达式为

$$n(r)=n_0\left(1-\frac{1}{2}gr^2\right) \quad (1)$$

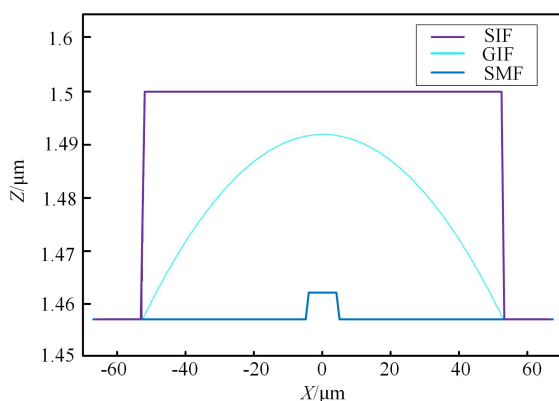


图2 仿真模型的光纤折射率分布

其中, r 为光线离径向中心轴的距离, n_0 为纤芯中心轴的折射率, g 为聚焦系数。GIF 的包层直径为 $125\ \mu\text{m}$,纤芯直径为 $105\ \mu\text{m}$,纤芯中心折射率 $n_3=1.492$,其纤芯折射率分布为

$$n(r)=1.492\times(1-1.05\times10^{-3}r^2) \quad (2)$$

1.1 准直效果

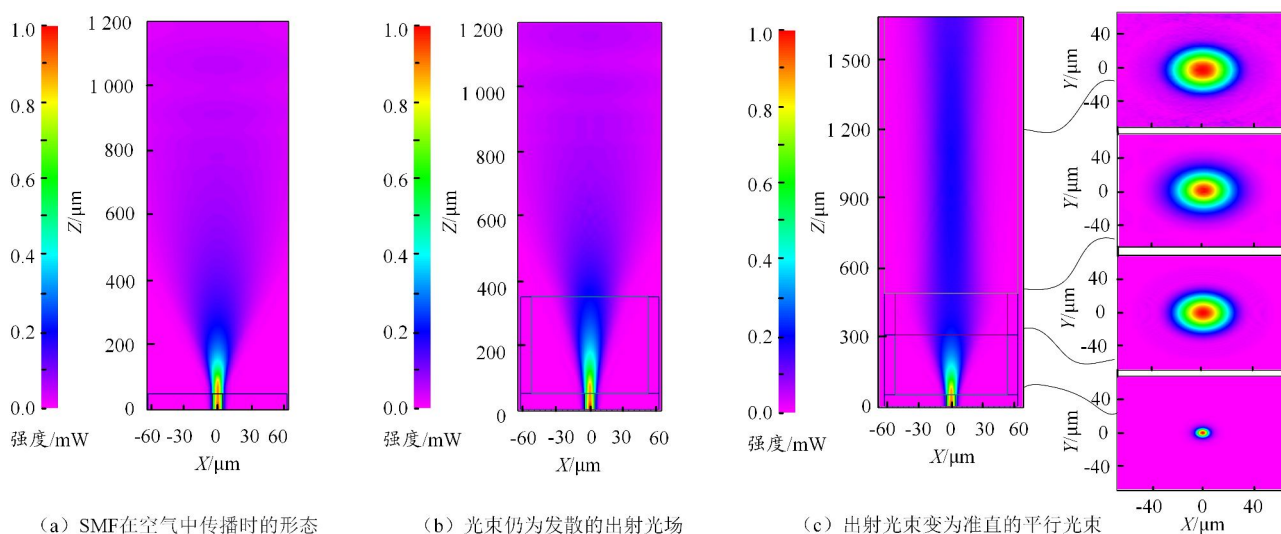
本文首先对光纤准直器的准直效果进行分析,归一化 SMF、SIF 和 GIF 组成的准直器仿真结果及截面出射光场对比如图3所示。图3(a)为 SMF 在空气中传播时的形态,即发散的高斯光束;当 SMF 与 SIF 连接后,较小的高斯模被扩束为较大的高斯光束,此时光束仍为发散状态,如图3(b)所示;而在 SMF 与 GIF 连接后,原本发散的光束转变为准直的平行光束,并能在空气中保持准直传播一段距离,如图3(c)所示。图中右边为不同光纤连接前后对应的截面出射光场图。可以看出,当 $Z=50\ \mu\text{m}$ 时,高斯基模较小;当 $Z=310\ \mu\text{m}$ 时为 SIF 的出射光场,此时的光束扩束为较大的高斯光束;当 $Z=580\ \mu\text{m}$ 时为 GIF 出射光场,此时光束仍保持较大的高斯光束传播;在空气中传播一段距离后,当 $Z=1\ 200\ \mu\text{m}$ 时,光束仍保持高斯模场分布。

在波长为 $1\ 550\ \text{nm}$ 时,不同长度组合的光纤准直器光束进入空气中的光场分布略有不同,本文设置 L_{SIF} 分别为 $0, 100, 200, 300\ \mu\text{m}$,通过调整 GIF 的长度 L_{GIF} 来观察光束在空气中传播的准直效果,如图4所示。可以看出,当 $L_{SIF}=0\ \mu\text{m}, L_{GIF}=375\ \mu\text{m}$ 时,准直距离较短;当 $L_{SIF}=100\ \mu\text{m}, L_{GIF}=280\ \mu\text{m}$ 时,扩束效果较小且准直距离较短;当 $L_{SIF}=200\ \mu\text{m}, L_{GIF}=200\ \mu\text{m}$ 时,扩束效果相对明显且准直距离增加;当 $L_{SIF}=300\ \mu\text{m}, L_{GIF}=195\ \mu\text{m}$ 时,扩束效果明显且准直距离较大。

1.2 模场直径可调

在调整 GIF 至合适的长度后,本文进行了 SIF 长

陈书玉, 杨世泰, 汪杰君, 等: 模场直径可调的光纤微准直器



(a) SMF在空气中传播时的形态 (b) 光束仍为发散的出射光场 (c) 出射光束变为准直的平行光束

图3 归一化 SMF、SIF 和 GIF 组成的准直器仿真结果及截面出射光场对比

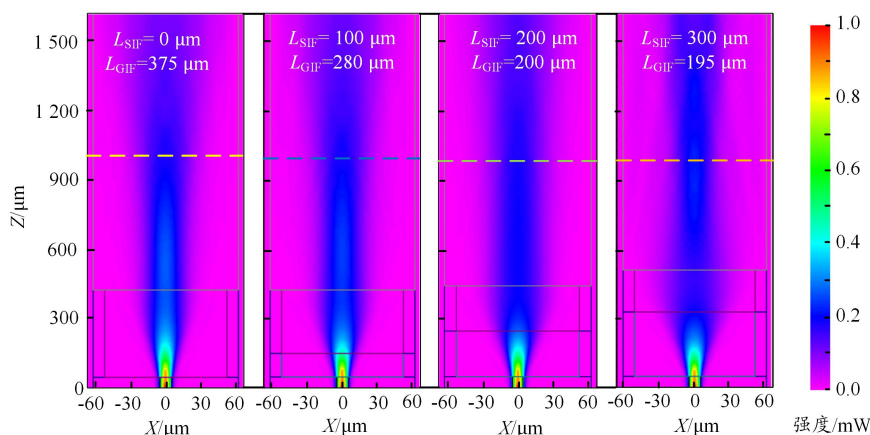


图4 不同长度组合的光纤准直器仿真结果图

度的扫描实验,发现不同长度的 SIF 对应的出射光场模场直径有所不同。通过对图 4 中 Z 轴正方向 $1000 \mu m$ 处的光场截面进行归一化处理,可以得出不同光纤长度 L_{SIF} 时模场直径的变化情况,如图 5 所示。图 5 中不同曲线上虚线标记的 2 点距离宽度为光场最大强度的 $1/e^2$ ($\approx 13.5\%$) 的宽度,4 段不同长度的 SIF 对应 4 段不同的虚线宽度(光场宽度),随着 SIF 的长度 L_{SIF} 的增加,光场宽度逐渐增加。

在 GIF 的长度与折射率分布保持不变的情况下,以 $10 \mu m$ 为步长扫描 SIF 的长度,将输出光场最大强度对应的宽度(或半径)视为模场直径,并取该直径的 100 倍(或根据实际需求调整倍数)作为参考,最终得到出射光模场直径与 SIF 长度的关系如图 6 所示。可以看出,随着 L_{SIF} 的增加,输出光束的模场直径会相应增大。因此,通过精准调整光纤长度,可以有效地调控模场直径的大小。

2 器件制备及测试

2.1 制备方法

本文以 SIF、GIF ($L_{SIF}=285 \mu m$ 、 $L_{GIF}=548 \mu m$) 与 SMF 的连接为例,简要阐述光纤准直器的制备过程。具体制备步骤如下:

步骤一:准备 SMF、SIF、GIF 各 1 m 长左右,剥除这 3 种光纤 2~3 cm 涂覆层。

步骤二:光纤熔接及切割。先将 SMF 与 SIF 熔接,随后采用定长度切割法将 SIF 切割至 $285 \mu m$;将切割完的 SIF 端与 GIF 熔接,接着采用定

长度切割法将 GIF 切割至 $548 \mu m$ 。

光纤定长度切割方法具体操作如下:首先,在显微镜下定位光纤熔接点,然后将切割刀头移至该点;接着,通过软件在显微镜下测量并标注所需切割的长度;之后,将刀头移动至标注位置并推动切割;最后,

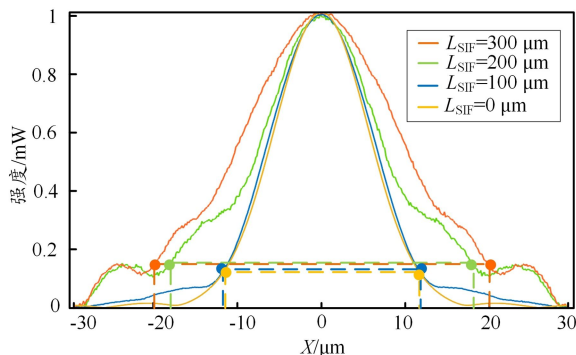


图5 不同 L_{SIF} 的光场分布

完成器件的制备。定长度切割后的准直器结构显微图如图 7 所示。

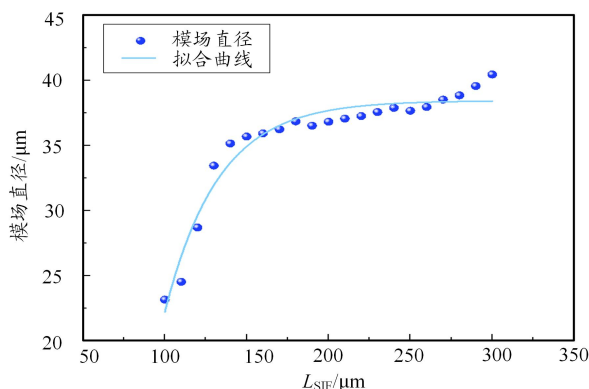


图 6 L_{SIF} 与模场直径的关系

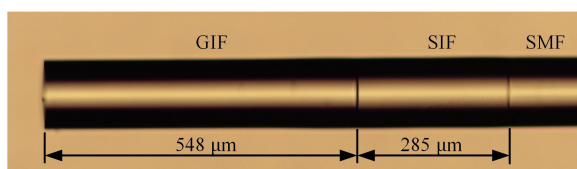


图 7 定长度切割后的准直器结构显微图

2.2 器件性能测试

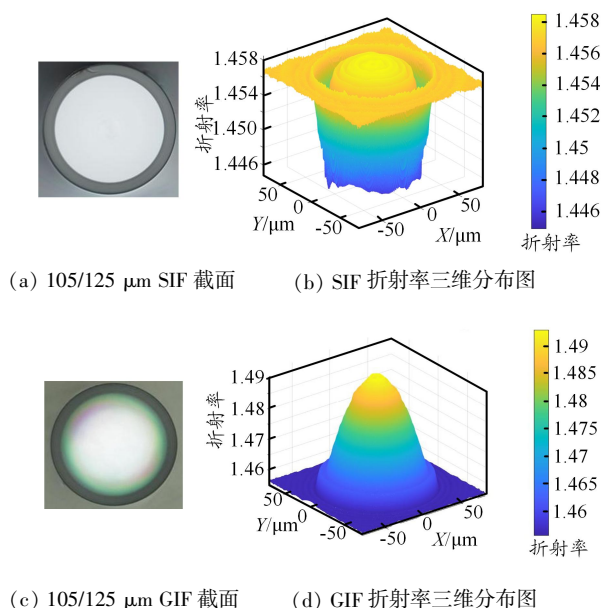
当波长为 1 550 nm 时, 实验所用的康宁 SMF-28 的 SMF、SIF 及 GIF 的参数指标如表 1 所示。

表 1 实验光纤部分参数

光纤类型	纤芯直径/ μm	包层直径/ μm	数值孔径(NA)
SMF	8.2	125 ± 0.7	0.14
SIF	105	125 ± 0.7	0.21
GIF	105	125 ± 0.7	0.31

SIF 及 GIF 的光纤截面及折射率分布如图 8 所示。可以看出, SIF 的折射率分布呈阶跃型, 即包层与纤芯之间存在较大的折射率差异。使用 105 μm 直径的纤芯能够有效地使入射光束得到充分的扩展; GIF 的折射率分布呈高斯分布, 即中心区域折射率较高, 并沿径向逐渐减小, 这种特性使得其聚焦效果较好。

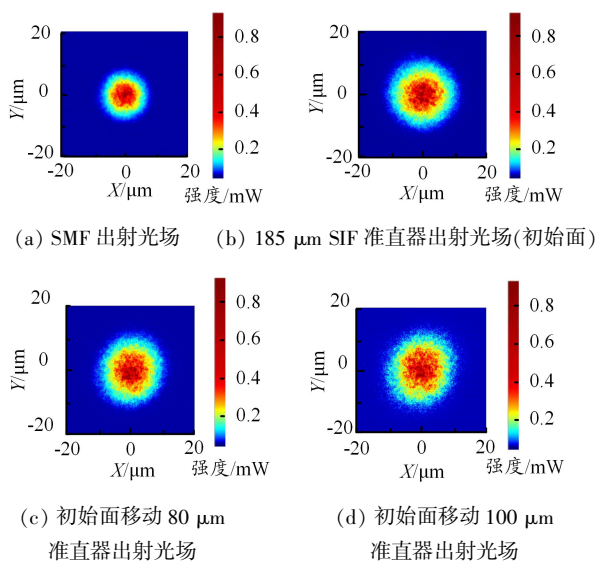
本文采用红外相机观察在输入功率后光纤端面的出射情况, 并使用 SMF 作为参照来标定其光场功率分布情况及模场直径。同时, 向 SMF 输入了 1 mW 的光功率。经过横向位移法^[11]的测试后, 测得该 SMF 的模场直径为 9.4 μm , 其出射光场图如图 9(a) 所示。以同样的方法, 观察 SIF 准直器的输出端面, 光斑最小尺寸位置, 定为初始面, 如图 9(b) 所示; 通过位移台调整光束分析仪与光纤端面的距离逐渐增大, 移动 80 μm 后光场分布如图 9(c) 所示, 可以看出光场尺寸未明显



(a) 105/125 μm SIF 截面 (b) SIF 折射率三维分布图

(c) 105/125 μm GIF 截面 (d) GIF 折射率三维分布图

图 8 光纤截面及折射率分布



(a) SMF 出射光场 (b) 185 μm SIF 准直器出射光场(初始面)

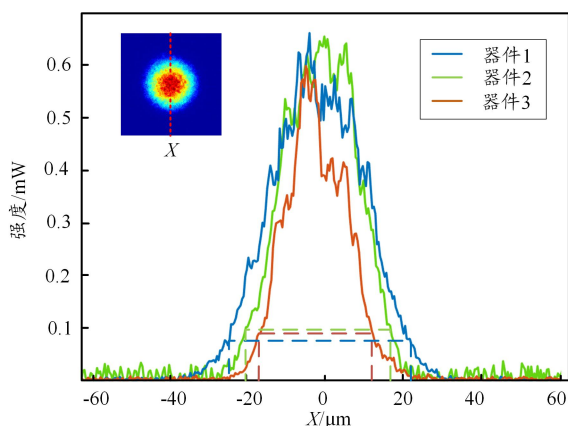
(c) 初始面移动 80 μm 准直器出射光场 (d) 初始面移动 100 μm 准直器出射光场

图 9 SMF 与 SIF 准直器出射端的光场对比

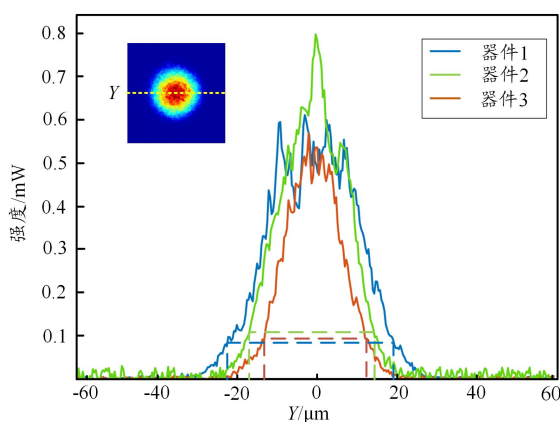
变化; 移动 100 μm 后光场分布如图 9(d) 所示, 可以看出光场呈微椭圆状且边缘不清晰, 故该 80 μm 为 185 μm SIF 准直器的有效准直距离。

该实验制备了 L_{SIF} 为 285、230、185 μm 3 种不同尺寸光纤准直器, 取最大强度的 $1/e^2$ 为模场直径, 不同 SIF 长度的器件出射光场的模场直径也不相同。将制备的不同光纤长度的器件分别通过光束分析仪观察输出光场, 取输出光场初始面最大强度的 $1/e^2$ 进行分析^[12-14], 分别对比 X 轴和 Y 轴方向上的光场直径, 如图 10 所示。图中左上图为 X、Y 方向示意, 下面的虚线宽度为出射光场的模场直径。通过计算得出 3 种器件

陈书玉, 杨世泰, 汪杰君, 等: 模场直径可调的光纤微准直器



(a) X轴方向不同器件的出射光场



(b) Y轴方向不同器件的出射光场

图 10 SIF 准直器的光场直径对比

表 2 实验结果对比

器件编号	$L_{\text{SIF}}/\mu\text{m}$	$L_{\text{CIF}}/\mu\text{m}$	准直长度/ μm	模场直径/ μm
1	285	548	68	42.90
2	230	545	76	36.57
3	185	549	80	35.67

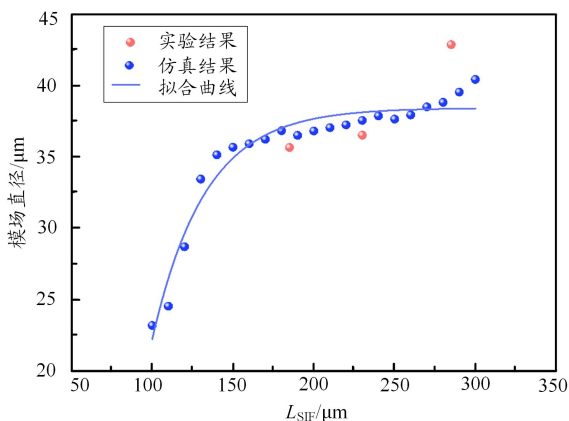


图 11 L_{SIF} 与模场直径的实验结果对比

在 X 轴与 Y 轴方向的模场直径的平均值为 42.9、36.57、35.67 μm 。最终实验结果如表 2 所示, 与仿真结果对比情况如图 11 所示。可以看出, 模场直径误差不超过 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

3 结束语

本文提出了一种模场直径可调的光纤微准直器的制备方法。运用光束传播法验证了“三明治”结构的光纤准直器, 并实验制备了 SMF、SIF 与 GIF 组合的光纤准直器。通过实验结果验证了不同长度的多模光纤组合可以实现模场直径可调。这种集成式光纤准直器制备方法简单、结构紧凑、成本较低, 可根据应用场所调整所用光纤以提供不同的输出光场模场直径并准直。作为光纤微准直器, 该器件具有紧凑的整体尺寸和高集成度, 能够调节不同的输出模场直径以满足各种应用需求。它能在保持有效输出面积增大的同时实现光束的准直, 并控制输出模场直径。

参考文献:

- [1] 刘德明, 向清, 黄德修. 光纤光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] 胡海蕾, 陈荣, 赖爱光, 等. C-lens 准直特性分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2005 (1): 36-40.
- [3] 熊华平, 曹明翠. 微型准直透镜的研究与设计[J]. 激光技术, 2003(5): 437-439.
- [4] 刁健, 李洪祚, 宋涛. 自聚焦透镜准直设计[J]. 仪器仪表用户, 2009, 16 (3): 83-84.
- [5] 代文, 杨远洪, 宋奎岩, 等. 基于渐变折射率透镜的低损耗 1×N 微结构光纤耦合方法[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 87-92.
- [6] 邢俊红, 焦明星, 刘芸. 自聚焦透镜在全固态激光器中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 127-131, 124.
- [7] 朱少丽, 徐秋霜, 刘德森. 自聚焦透镜在光纤准直器中的应用分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2004(3): 379-382.
- [8] SHEN W, WU X, MENG H, et al. Long distance fiber-optic displacement sensor based on fiber collimator [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(12): 123104-1-123104-4.
- [9] 李彦, 赵远, 徐小斌, 等. 基于 C-lens 的光子带隙光纤准直器传输特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(8): 1517-1522.
- [10] 王驰, 许婷婷, 毕书博, 等. 测量自聚焦光纤透镜聚焦常数的曲线拟合算法[J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3309-3315.
- [11] 陈晨, 徐宏杰, 贾明. 保偏光纤模场直径和数值孔径测试研究[J]. 光学仪器, 2017, 39(4): 7-12.
- [12] 刘若仙, 赵士元, 谷一英, 等. 光纤阵列准直器设计及其发散角测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(1): 89-98.
- [13] 王福娟, 蔡志岗, 刘娅钊, 等. 扩芯光纤原理及其在光器件耦合中的应用[J]. 光学学报, 2005(6): 737-742.
- [14] 刘娅钊, 王福娟, 蔡志岗, 等. 两种扩束透镜光纤的研制与模场分析[J]. 中国激光, 2005(10): 75-79.