

基于自聚焦光纤的 980 nm 波段模场适配器

梁浩源 罗永辉 张宇硕 陈默 陈冬旭 何乐 邢颖滨 彭景刚

戴能利[†] 李进延

华中科技大学, 武汉光电国家研究中心, 武汉 430070

摘要

为解决 980 nm 波段掺镱光纤激光器中大模场 (20/130 μm) 至小模场 (9/125 μm) 的耦合损耗问题, 本文提出多周期自聚焦光纤与热扩芯协同优化的模场适配器。利用自聚焦光纤实现周期性模场变换, 并通过对接收光纤热扩芯以补偿模场直径误差。最终, 将优化制备的自制模场适配器集成至自主搭建的 980 nm 光纤激光器系统中进行验证。系统原始斜效率为 15.15%, 光-光效率为 13.65%。接入自制模场适配器后, 系统斜率效率为 14.18%, 光-光效率为 12.63%, 模场适配器自身插入损耗最低为 0.34 dB。商用模场适配器在 980 nm 波段实测损耗普遍大于 0.7dB, 在相同系统中接入插损为 0.76 dB 的商用 MFA 后, 系统斜率效率与光-光效率分别降至 12.71% 与 11.43%。与商用模场适配器相比, 自制模场适配器损耗有效降低, 效率提升显著。该方案为高亮度 980 nm 光纤激光器的泵浦耦合提供了一种有效的器件解决方案。

关键词: 模场适配器, 980 nm 光纤激光器, 自聚焦光纤, 光纤热扩芯

PACS: 42.79.Gn, 42.79.Ry, 42.55.Wd, 42.81.Bm

[†] 通信作者.E-mail: dainl@hust.edu.cn

第一作者.E-mail: m202373323@hust.edu.cn

1 引言

近年来, 工作于 980 nm 波段的高亮度光纤激光器因其具有独特优势^[1-4], 发展迅猛。它不仅可以通过倍频产生蓝绿光^[5,6], 还可以作为有更高亮度的抽运源, 抽运掺铒和掺镱光纤, 获得更高功率的激光输出^[7]。随着信号传输容量指数增长, 采用多个宽带掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 并行光放

大^[8,9]是提高传输容量的可行方案，但这需要大量单模 980 nm 激光二极管（Laser Diode, LD）来满足高总泵浦功率需求。为降低成本并提高集成度，发展高功率单模 980 nm 单片激光器成为关键。在此背景下，掺镱光纤激光器（Ytterbium-Doped Fiber Laser, YDFL）因其全光纤输出特性，与 EDFA 系统兼容性更好，成为理想的泵浦源之一。

1989 年，英国南安普顿大学 Hanna 等人首次实现了 980 nm 波段连续掺镱光纤激光器的输出^[10]。此后，980 nm 光纤激光器的研究持续深入，在光纤设计上，实现了从传统阶跃折射率光纤向高性能双包层、微结构等特种光纤的演进；在系统构架上，则完成了从分立光学元件组合向全光纤器件一体化集成的重要跨越^[11-15]。

高亮度 980 nm 光纤激光器是 EDFA 的关键泵浦源，但其向更高功率与更高亮度发展过程中面临模场适配的技术瓶颈：为抑制非线性效应、提升损伤阈值并维持近衍射极限的光束质量，激光器的有源增益光纤及输出尾纤通常采用大模场光纤^[16-20]；然而，主流 EDFA 系统的泵浦输入端口及内部耦合结构普遍基于标准单模光纤设计。二者之间巨大的模场失配，严重制约系统效率并带来热管理风险。

在此背景下，模场适配器（Mode Field Adapter, MFA）作为维持单模传输、抑制高阶模激发的核心器件，其性能直接决定了 980 nm 信号在放大过程中的模式纯度与能量传输效率，进而影响系统的整体稳定性与泵浦利用率。然而，现有 MFA 普遍存在模场匹配精度不足、插入损耗累积，进一步削弱本已受限的光-光转换效率、功率承载能力有限等瓶颈，导致系统难以突破低功率、低稳定性与低可靠性的困局。

因此，MFA 的技术成熟度已成为制约 980 nm 光纤激光器实用化的关键工程瓶颈。若 MFA 能在超低损耗、模场精准匹配等方面取得突破，将为克服 980 nm

光纤激光器的固有挑战提供关键支撑,推动高功率、高光束质量、高效率的 980 nm 光纤激光系统走向实用化。

文献中报道的 MFA 多集中于 1064 nm 或 1310 nm 通信波段^[21-24],其输入输出光纤类型与 980 nm 光纤激光器作为 EDFA 泵浦源的实际应用场景存在明显差异。表 1 汇总了近期文献中报道的 MFA 性能参数。

表 1 文献中 MFA 性能参数

Table 1. Main simulation parameters

机构	工作波长/nm	输入光纤	输出光纤	制备工艺	插入损耗/dB
国防科学技术大学 ^[21]	1060	4/125	20/400	拉锥与热扩芯结合	0.3
北京理工大学 ^[22]	1064	10/130	6/125	热扩芯	0.41
天津大学 ^[23]	1310	8.2/125	50/125	拉锥、热扩芯	0.02
上海大学 ^[24]	1064	5.3/125	25/400	拉锥与热扩芯复合	0.23
本文	976	20/130	9/125	自聚焦光纤+热扩芯	0.34

需要指出的是,由于各研究采用的工作波长、光纤类型、模场失配跨度存在显著差异,表中损耗数值不宜直接进行跨文献比较。例如,文献[23]虽实现了极低的损耗值,但其工作于通信波段,且所针对的模场失配跨度与本工作不同;文献[24]在 1064 nm 波段实现了 0.23 dB 的低损耗,但其输入输出光纤方向为小模场至大模场,与本工作相反。相比之下,本文聚焦于 980 nm 泵浦波段,针对

20/130 μm 大模场光纤至 9/125 μm 单模光纤这一特定应用场景，在完整激光器系统中实现了 0.34 dB 的插入损耗，填补了该波段高性能 MFA 的研究空白。

在制备工艺上，文献方案主要围绕光纤拉锥与热扩芯技术展开，前者受绝热条件限制难以实现大跨度模场匹配，后者虽能有效扩大模场，但单一热扩芯工艺对模场形态的主动调控能力有限。这种局限性在商业化产品中同样存在。以市售产品为例，某商用 MFA 在 1 μm 波段工作波长为 1020 nm~1080 nm，输入光纤为 20/125 μm 光纤，输出光纤为 6/125 μm 的 Hi1060 光纤时，插入损耗不高于 0.5 dB；另一商用 MFA 在 1 μm 波段工作波长为 1100 nm~1200 nm，与前者采用相同输入输出光纤配置，其测试报告显示在波长 1064 nm、功率 1 mW 条件下损耗为 0.45 dB。上述产品均未覆盖 980 nm 波段，且其制备工艺多采用单一热扩芯技术，难以通过更丰富的波导结构设计实现模场精准调控。经实际测试，多款商用 MFA 在 980 nm 光纤激光器系统中的插入损耗均高于 0.7 dB，难以满足高亮度泵浦耦合对低损耗器件的苛刻要求。因此，针对 980 nm 波段研制高性能模场适配器具明确的应用需求与研究价值。

为解决上述问题，本文提出并研究了一种基于自聚焦光纤（Graded-Index Optical Fiber, GIOF）并结合接收端光纤热扩芯协同优化的新型 MFA 方案。自聚焦光纤凭借其固有的渐变折射率分布，可在固定长度内实现光束的周期性聚焦与模场确定性变换，为高效模场匹配提供了全新原理。将制备的 MFA 集成至自主搭建的 980 nm 光纤激光器系统中，实现了最低 0.34 dB 的插入损耗。本工作为 980 nm 波段高亮度光纤激光器所面临的模场匹配难题，提供了一种高效、可靠的器件解决方案。

2 自聚焦光纤设计

2.1 自聚焦光纤原理简介

自聚焦光纤是典型的渐变折射率光纤，其基本原理源于其独特的折射率分布：纤芯区域的折射率从中心轴最大值 n_0 沿径向 r 连续、平滑地递减，通常近似遵循平方律分布：

$$n(r) = \begin{cases} n_0 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2}, & 0 \leq r \leq a \\ n_{clad}, & r > a \end{cases}, \quad (1)$$

其中 $n(r)$ 是距离光纤中心 r 处的折射率， n_0 是光纤中心($r=0$)折射率， a 为光纤的纤芯半径， r 是点到光纤中心的距离， n_{clad} 是包层折射率， Δ 是相对折射率差，定义为：

$$\Delta = \frac{n_0^2 - n_{clad}^2}{2n_0^2}, \quad (2)$$

根据张韬等人的推导^[25]，自聚焦光纤中光的传播轨迹方程为：

$$r(z) = \sqrt{r_0^2 + \frac{\sin^2 i}{k^2}} \sin \left(\frac{k}{\sqrt{n_0^2 - k^2 r_0^2 - \sin^2 i}} z + \arctan \frac{kr_0}{\sin i} \right), \quad (3)$$

根据式(3)可知，光线在自聚焦光纤纤芯内遵循正弦轨迹传播。当光纤的相关参数 n_0 和 k 确定后，光线的具体传播路径由初始径向位置 r_0 和初始入射角 i 共同决定。

为直观展示上述规律，基于光线传播轨迹方程，利用 MATLAB 对自聚焦光纤中的光线轨迹进行了数值仿真。在参数设定为 $n_0=1.47$ ， $k=1$ 的条件下，模拟了三种不同初始条件下的传播轨迹，分别为：

$r_0=0$ ， $i=\pi/6$ （中心入射，小角度偏折）

$r_0=1$ ， $i=0$ （偏心入射，平行于轴）

$r_0=2$ ， $i=\pi/3$ （较大偏心与大角度入射）

仿真结果如图 1 所示，三条轨迹均呈现标准的正弦振荡形式，且其振幅与相位明显依赖于初始条件 (r_0, i) ，从而直观验证了式(3)所描述的光线传播规律。

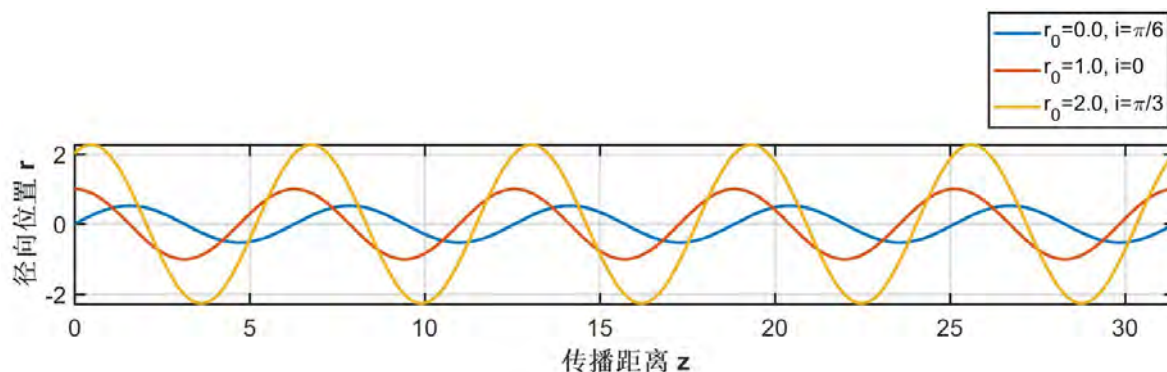


图 1 自聚焦光纤中光的传播轨迹

Fig.1. Propagation trajectory of light in graded-index optical fiber

自聚焦光纤的自聚焦周期 P ，反映光纤中模场直径经历一个周期性变化的长度，表达式为：

$$P = \frac{\pi n_0}{k}, \quad (4)$$

其中：

$$k = \frac{\sqrt{n_0^2 - n_{clad}^2}}{a} = \frac{n_0 \sqrt{2\Delta}}{a}, \quad (5)$$

P 代表光线完成一次完整振荡，即从轴线出发，偏至最大幅度后返回轴线所需的轴向传播距离。因此，在任意相距整数倍周期 mP ($m=1, 2, 3, \dots$) 两个截面上，光线的分布状态包括光斑尺寸与波前曲率将完全相同，实现周期性成像与聚焦。这一特性是自聚焦光纤能应用至 MFA 的物理基础。

使用 MATLAB 模拟了 $n_0 = 1.47$ ， $k = 1$ 时自聚焦光纤内部光线的聚焦情况，结果如图 2 所示。光线具有聚焦性和周期性向前传输。

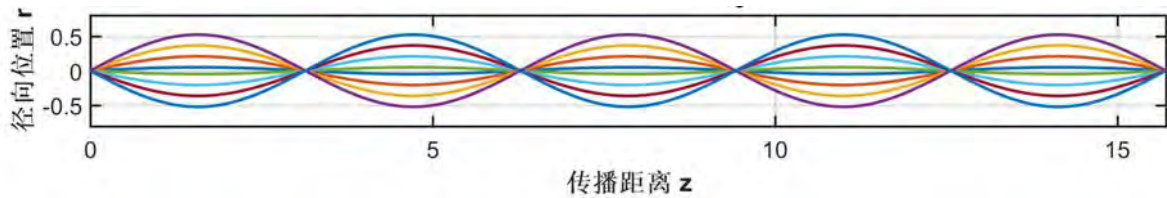


图2 自聚焦光纤内部光线的聚焦情况

Fig.2. The focusing condition of light rays inside a graded-index optical fiber

基于上述周期性聚焦特性，当一段自聚焦光纤的长度 L 被精确控制时，可实现对输入光场的确定性变换：若 $L = P/2$ ，输入端面的点光源（或小模场）将在输出端面被转换为平行光束（或大模场），反之亦然；若 $L = P$ ，输出场分布与输入场呈倒像关系。因此，通过精确设计 L 或调整折射率分布参数 Δ 与纤芯半径 a ，可在输入端与输出端之间实现特定的模场直径缩放比，从而在物理上直接、高效地解决不同光纤之间的模场匹配问题。

在本研究中，输入光线可近似为平行光，当自聚焦光纤长度 L 满足 $L = nP + 0.5P (n \geq 1)$ ，即半周期叠加整数倍周期，其输出端光场分布具有重复性，可将输入的平行光在输出端面转换为小模场。

总而言之，自聚焦光纤通过其固有的平方律折射率分布，使光在传输过程中经历确定性的周期性聚焦演化。这一物理本质使其成为实现低损耗、确定性模场变换的理想介质，为高性能模场适配器的设计与制备提供了理论可行性与工程灵活性。

2.2 初始设计与优化

高亮度 980 nm 光纤激光器作为掺铒光纤放大器的泵浦源，其输出需耦合至单模光纤。因此，本研究初始目标是设计一种 MFA，实现从 20/130 μm 大模场光纤到常规单模光纤的高效连接。在初始设计阶段，选用芯包比 6/125 μm ，数值孔径 $NA = 0.14$ 的 Hi1060 单模光纤作为 MFA 的输出端，旨在与常见的泵浦输入光

纤兼容。

基于此目标,采用 RSoft 软件的 BeamPROP 模块进行建模仿真。如图 3 所示,仿真模型由三部分构成:输入端为 20/130 μm 无源光纤, MFA 主体为自聚焦光纤,输出端为 Hi1060 单模光纤,图中黄色部分表示纤芯结构。该模型用于系统分析自聚焦光纤的折射率参数对最终耦合效率的影响。仿真所用主要参数如表 2 所示。

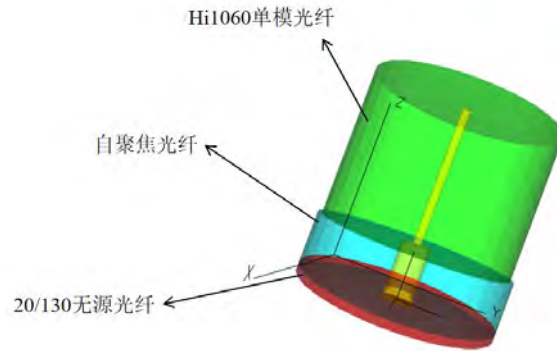


图 3 Rsoft 仿真建模

Fig.3. Rsoft simulation modeling

表 2 仿真主要参数

Table 2. Main simulation parameters

参数	取值
背景折射率	1
工作波长	976 nm
20/130 μm 光纤纤芯折射率	1.4593
20/130 μm 光纤包层折射率	1.4571
Hi1060 光纤纤芯折射率	1.464
Hi1060 光纤包层折射率	1.4573
自聚焦光纤包层折射率	1.4571
自聚焦光纤纤芯直径	20 μm
自聚焦光纤包层直径	130 μm

由于 BeamPROP 模块默认仅支持设定均匀折射率,为准确模拟自聚焦光纤的渐变折射率分布,需通过外部文件导入其折射率剖面。Rsoft 软件所要求的折射率文件须为矩阵格式,且矩阵元素需经过归一化处理:其中取值为 0 的元素对应于包层折射率,其余非零元素则表示该位置处归一化后的相对折射率。考虑到折射率矩阵为方形网格,而纤芯截面为圆形,因此将纤芯区域以外的矩阵元素均设为 0。

基于自聚焦光纤的平方律折射率分布特性,利用 MATLAB 生成对应纤芯截面的折射率矩阵。设定纤芯半径为 $10\ \mu\text{m}$,构建 100×100 的网格矩阵。在固定包层折射率 $n_{clad} = 1.4571$ 的前提下,以纤芯中心折射率 n_0 作为唯一变量,通过调节 n_0 即可控制整个渐变折射率分布。

纤芯中心折射率 n_0 是决定自聚焦周期 P 与出射光束发散角的关键参数。仿真发现, n_0 存在一个最优区间:当 n_0 过低(如接近包层折射率)时,折射率梯度过小,导致自聚焦周期 P 过长,光束会聚能力弱,出射模场直径过大,难以与小模场光纤匹配。如当 $n_0 = 1.4593$ 时,仿真结果如图 4 所示。仿真显示,聚焦点处的模场直径增大至 $10\ \mu\text{m}$ 以上,已超过单模光纤的模场直径,且聚焦效果明显减弱。

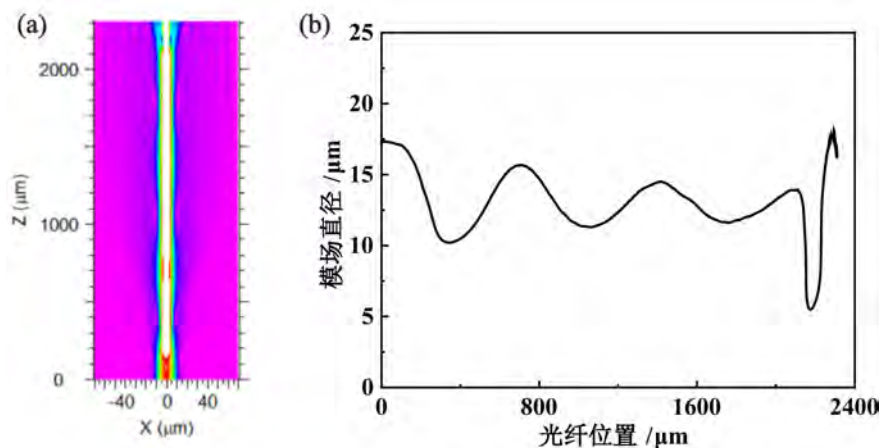


图 4 纤芯中心折射率 1.4593 的仿真结果 (a) 光场分布图 (b) 模场直径变化图

Fig.4. Simulation results for a core center refractive index of 1.4593 (a) Optical field distribution diagram (b) Mode field diameter variation diagram

当 n_0 过高时, 虽然周期 P 缩短、会聚能力强, 但会导致出射光束发散角过大, 超过单模光纤的接收角, 引发严重的角度失配损耗。如当 $n_0 = 1.5$ 时, 仿真结果如图 5 所示。仿真显示, 在聚焦点处耦合时, 光产生严重泄漏, 输出功率急剧下降, 剩余功率不足初始值的 10%。

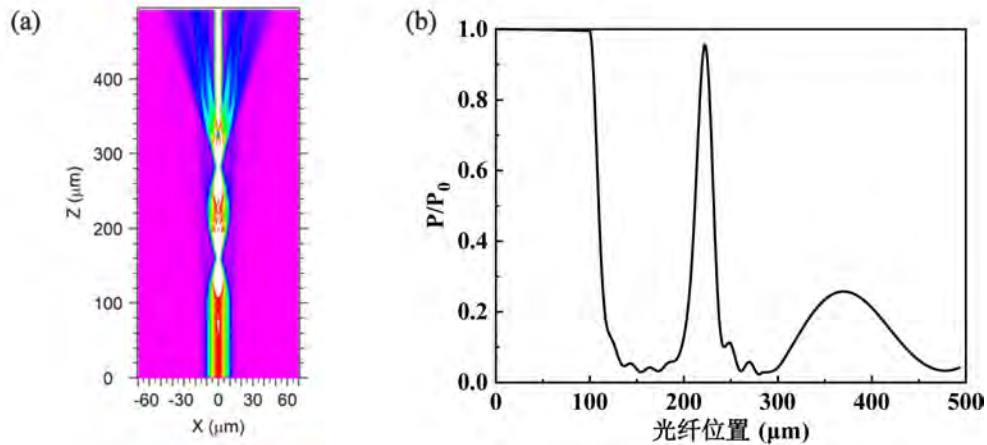


图 5 纤芯中心折射率 1.5 的仿真结果 (a) 光场分布图 (b) 模场直径变化图

Fig.5. Simulation results for a core center refractive index of 1.5 (a) Optical field distribution diagram (b) Mode field diameter variation diagram

基于上述分析, 为在“模场尺寸匹配”与“发散角接收”之间取得最佳平衡, 本研究对 n_0 进行了系统性的参数扫描仿真。以输出端与 Hi1060 单模光纤的耦合损耗为评价指标, 最终确定了针对该输出光纤的最优纤芯中心折射率 $n_0 = 1.4655$ 。在此参数下, 仿真获得的系统耦合损耗约为 0.5 dB, 其仿真结果如图 6 所示, 可见光束能有效会聚并耦合进单模光纤。

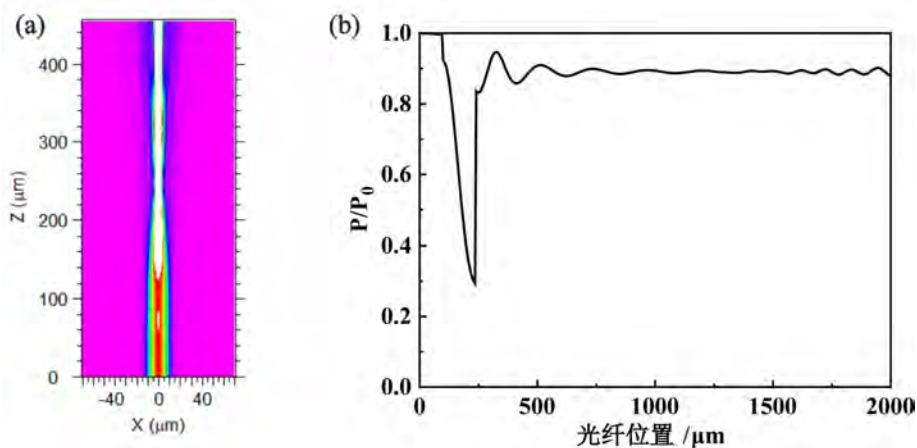


图 6 连接 Hi1060 光纤的最优仿真结果 (a) 光场分布图 (b) 模场直径变化图

Fig.6. Optimal simulation results for connecting Hi1060 fiber (a) Optical field distribution diagram

(b) Mode field diameter variation diagram

然而，0.5 dB 的耦合损耗对于追求极高效率的高亮度泵浦耦合应用而言，仍存在明显的优化空间。分析表明，这一瓶颈主要源于 Hi1060 光纤较小的模场直径与相对较高的数值孔径，其对光场的强约束效应限制了自聚焦光纤模场变换能力的充分发挥。因此，为进一步突破损耗极限，需从优化接收光纤的角度寻求新的解决方案。

2.3 输出光纤的优化选择

基于以上分析，将输出光纤由 Hi1060 光纤更换为 $NA = 0.12$ 的 $9/125 \mu\text{m}$ 单模光纤。相对于 Hi1060 光纤， $9/125 \mu\text{m}$ 光纤纤芯半径更大，基模模场直径相应更大，因而对自聚焦光纤出射光场的模场匹配容差更大，更易于实现低损耗耦合。

本研究以 $9/125 \mu\text{m}$ 单模光纤为目标，对自聚焦光纤的纤芯中心折射率 n_0 进行了重新优化。仿真结果表明，最优 n_0 值为 1.4607。此时仿真结果如图 7 所示。此时输出/输入功率比约 96%，对应损耗约 0.26 dB。该优化对应的折射率剖面分布如图 8 所示。

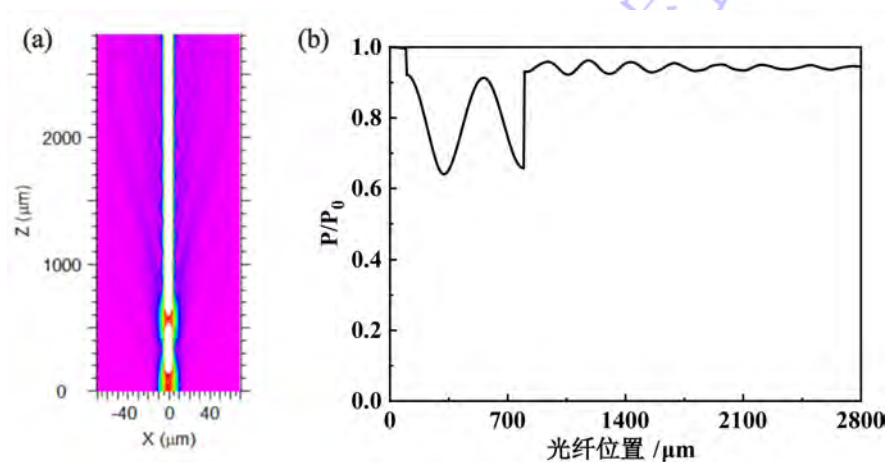


图 7 连接 $9/125 \mu\text{m}$ 光纤的最优仿真结果 (a) 光场分布图 (b) 模场直径变化图

Fig.7. Optimal simulation results for connecting 9/125 μm fiber (a) Optical field distribution

diagram (b) Mode field diameter variation diagram

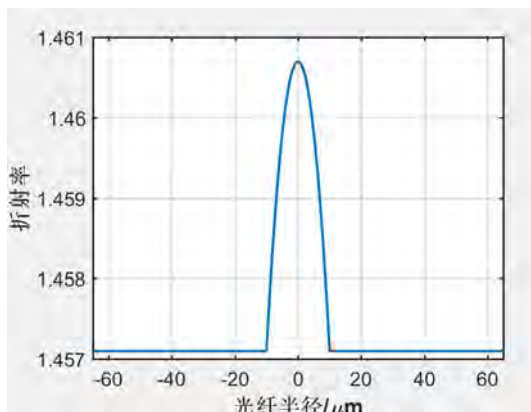


图 8 自聚焦光纤折射率剖面

Fig.8. Graded-index optical fiber refractive index profile

基于自聚焦光纤的周期性聚焦原理，在长度满足 $L = nP + 0.5P (n \geq 1)$ 的条件下，即半周期位置叠加整数倍完整周期，其输出端光场分布具有重复性。为验证该公式的普适性，仿真比较了第 2、5、7 个半周期焦点处的耦合情况。光场分布如图 9 所示，三处光场分布高度一致；其对应的功率变化曲线如图 10 所示，输出/输入功率比稳定在约 96.0%，对应损耗约 0.26 dB，严格证实了长度公式的正确性，为自聚焦光纤切割提供了可靠依据。

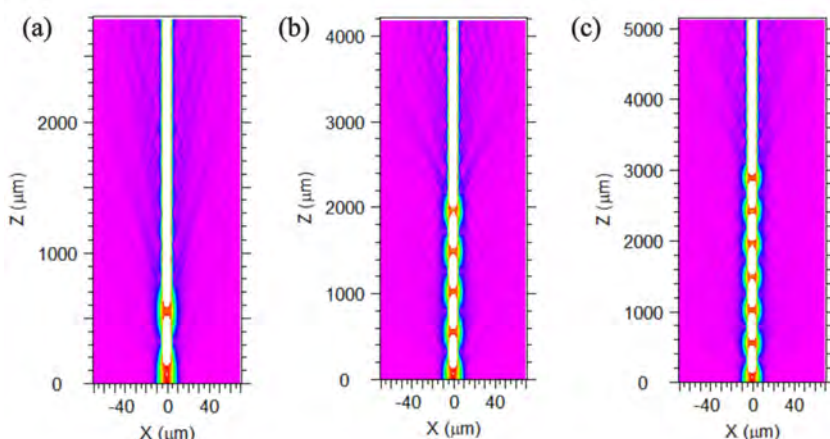


图 9 分别在 2、5、7 个聚焦点连接 9/125 μm 光纤的光场分布图 (a) 第 2 聚焦点 (b) 第 5 聚焦点 (c) 第 7 聚焦点

Fig.9. Optical field distribution diagrams of connecting 9/125 μm fibers at 2, 5, and 7 focal points

respectively (a) 2nd focal point (b) 5th focal point (c) 7th focal point

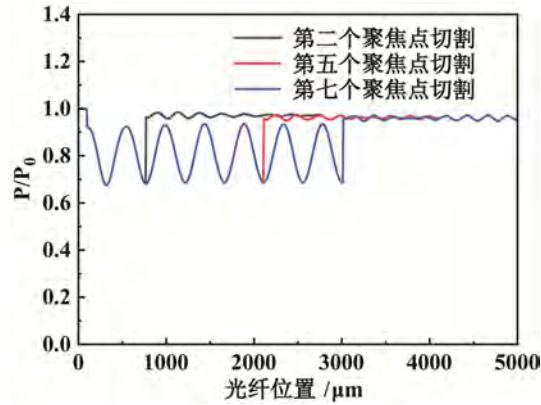


图 10 分别在 2、5、7 个聚焦点连接 9/125 μm 单模光纤的功率变化图

Fig.10. Power variation diagrams of connecting 9/125 μm single-mode fiber at 2, 5, and 7 focal points respectively

为评估实际工艺，将实际制备的自聚焦光纤折射率剖面（图 11）导入模型。仿真得其实际周期 $P_{actual} \approx 450 \mu\text{m}$ 。在满足条件 $L = nP_{actual} + 0.5P_{actual}$ ($n \geq 1$) 的长度下，对多个半周期聚焦点的性能进行了仿真验证。如图 12 所示，激光在第 2、5、7 个聚焦点处均能有效地耦合至单模光纤；相应的归一化功率演变如图 13 所示，在上述各点处的输出/输入功率比均稳定在 97.0%左右，对应耦合损耗约为 0.13 dB。

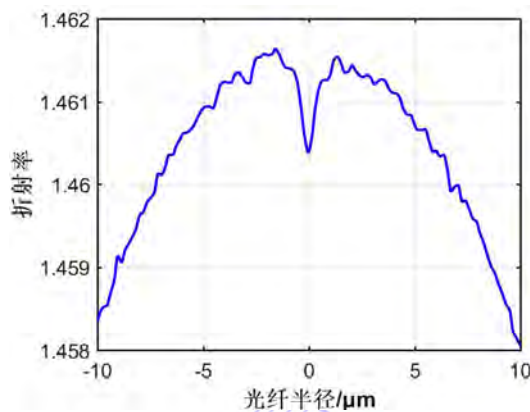


图 11 自聚焦光纤实测纤芯折射率剖面

Fig.11. Measured core refractive index profile of graded-index optical fiber

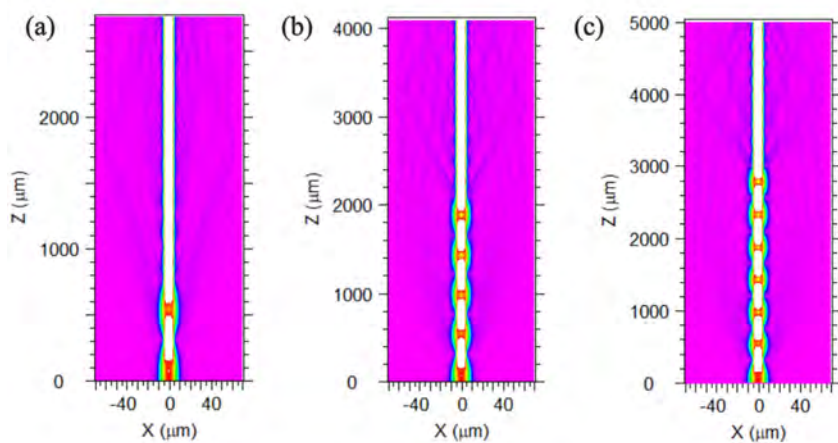


图 12 制备的自聚焦光纤分别在 2、5、7 个聚焦点连接 $9/125\ \mu\text{m}$ 光纤的光场分布图 (a) 第 2 聚焦点 (b) 第 5 聚焦点 (c) 第 7 聚焦点

Fig.12. Optical field distribution diagrams of the prepared graded-index optical fibers, connected to $9/125\ \mu\text{m}$ fibers at 2, 5, and 7 focal points respectively (a) 2nd focal point (b) 5th focal point (c)

7th focal point

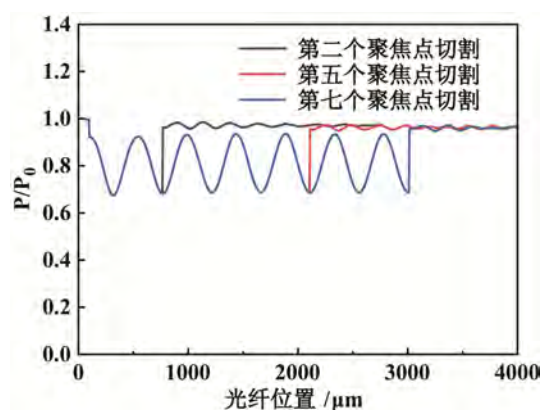


图 13 制备的自聚焦光纤分别在 2、5、7 个聚焦点连接 $9/125\ \mu\text{m}$ 单模光纤的功率变化图

Fig.13. Power variation diagrams of the prepared graded-index optical fibers connected to $9/125\ \mu\text{m}$ single-mode fibers at 2, 5, and 7 focusing points respectively

3 实验结果与分析

3.1 自聚焦光纤初始性能测试

基于第二章确定的 $n_0 = 1.4607$ 及长度选择公式，对实际拉制的自聚焦光纤进行切割。实验中使用游标卡尺的精度为 $0.01\ \text{mm}$ ，内部计算

$L_{theory} = nP_{actual} + 0.5P_{actual}$ ($n \geq 1$) 保留至 0.001 mm，随后将结果四舍五入至最近的 0.01 mm 刻度。如 $n = 333$ 时， $L_{theory} = 150.075$ mm，经取整后确定 $L_{exp} = 150.08$ mm。此调整引入的最大可能长度偏差为 ± 0.005 mm，仅为聚焦周期 P_{actual} 的约 1.1%，远小于一个完整的聚焦周期。仿真分析表明，此微小长度偏差对输出模场分布及耦合损耗的影响可忽略不计。

切割满足上文长度 L_{exp} 的自聚焦光纤，制备了 8 个自聚焦光纤 MFA 样品，将其接入 976 nm 低功率测试系统中测量其插入损耗。测试系统如图 14 所示，该系统以输出 976 nm 单模激光的 LD 为光源，其尾纤为 Hi1060 光纤，最大输出功率约 250 mW。为模拟实际光纤激光器系统中激光从 20/130 μm 大模场光纤输出的场景，在光源后接入一个商用 MFA，将光高效耦合至一段 20/130 μm 光纤中。输出端使用 Thorlabs PM100D 积分球测量功率。此系统为 976 nm 单模泵测试系统。通过对比熔接 MFA 前后系统的输出功率 P_0 与 P_1 ，依据以下公式计算 MFA 的插入损耗：

$$\alpha = -10 \lg \frac{P_1}{P_0}, \quad (6)$$



图 14 自聚焦光纤测试系统结构

Fig.14. Structure of graded-index optical fiber test system

9/125 μm 单模光纤与商用 MFA 输出端 20/130 μm 光纤直接熔接损耗为 2.15 dB。切割长度为 L_{exp} 的自聚焦光纤并熔接进系统后，分别测量接入自聚焦光纤和 9/125 μm 单模光纤前后的输出光功率，据此计算各次实验的插入损耗，测试结果

如表 3 所示。初始损耗分布于 0.73 dB 至 1.20 dB 之间，平均值为 0.94 ± 0.14 dB。这一结果显著高于仿真预测的理论下限，明确揭示了实际器件中存在不可忽视的额外损耗源。

表 3 长度 L_{exp} 的自聚焦光纤实测损耗

Table 3. Measured loss of graded-index optical fiber with length L_{exp}

测量次数	损耗/dB
1	1.20
2	0.98
3	0.87
4	0.73
5	0.88
6	1.07
7	0.84
8	0.97

3.2 原因分析与热扩芯优化

经分析，此偏差主要源于“切割点的轴向定位误差”。在现有操作精度下，仍难以保证每次切割都恰好位于理论聚焦点。微小的轴向偏差将导致自聚焦光纤出射端的实际模场直径大于设计值，从而与 $9/125 \mu\text{m}$ 单模光纤的模场失配，引入额外的耦合损耗。这表明，模场失配仍是制约实测性能的主要因素。

为消除上述失配，对单模光纤执行热扩芯处理：使用 LZM-100 熔接机的 CO_2 激光器，功率 $18.54 \text{ W} \pm 0.5 \text{ W}$ ，沿光纤轴向步进 2 mm 作为一个加热周期，单周期时长 200 s ，周期性加热 6 次，周间冷却 3 至 5 分钟，可获得与自聚焦光纤出射模场最为匹配的 $9/125 \mu\text{m}$ 光纤端面。将此优化后的光纤与精确切割的长度 L_{exp}

的自聚焦光纤熔接，构成完整的 MFA 器件进行测试，获得了最低 0.22 dB 的插入损耗。完整 MFA 结构如图 15 所示。

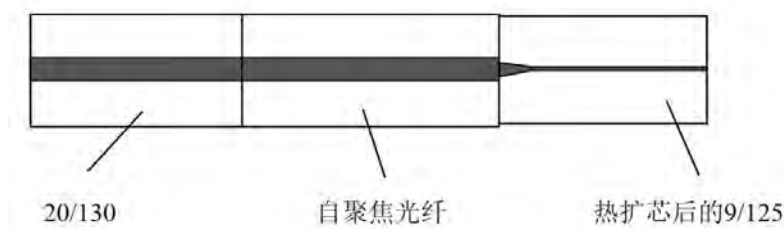


图 15 完整 MFA 结构

Fig.15. Complete MFA structure

为评估该工艺的稳定性和可重复性，在最佳参数下进行了多轮次制备与测试。统计结果表明，绝大多数器件的损耗可稳定控制在 0.4 dB 以内，证明了上述方案的工艺鲁棒性。

本次优化的关键数据对比如下：未经热扩芯时，系统最低损耗为 0.73 dB；而引入 9/125 μm 光纤热扩芯后，最低损耗显著降至 0.22 dB，降幅达 70%。这一结果的显著改善，直接且有力地证实了前文的推论：限制自聚焦光纤 MFA 性能的主要因素正是其出射端与标准单模光纤之间的模场失配。通过热扩芯主动调控接收光纤的模场，成功缓解了此失配问题，从而实现了耦合效率的提升。

4 系统级验证

将多个 MFA 样品集成至自主搭建的 980 nm 光纤激光器系统进行性能验证。980 nm 光纤激光器结构如图 16 所示。该系统以 915 nm 半导体激光器作为泵浦源，采用线型谐振腔结构：高反射率光纤布拉格光栅（High Reflectance-Fiber Bragg Grating, HR-FBG）与输出耦合光纤布拉格光栅（Output Coupler-Fiber Bragg Grating, OC-FBG）分别作为谐振腔的后镜与输出耦合镜，从而在该波长处形成有效的反馈并实现激光振荡输出。谐振腔内增益介质为一段 0.3 m 的 20/130 μm 双

包层掺镱光纤 (Yb-doped fiber, YDF)。本系统所采用的 0.3 m YDF 长度, 是经前期优化后确定的最佳值, 可在保证高斜率效率与光-光转换效率的同时, 有效避免 1030 nm 放大自发辐射 (Amplify Spontaneous Emission, ASE) 的竞争。在输出耦合光栅 OC 之后, 接入了包层光剥除器 (Cladding Power Stripper, CPS), 用于滤除未能被镱离子吸收而残留于包层中的 915 nm 泵浦光, 确保输出光谱纯度。输出端熔接一段 105/125 μm 光纤, 并在该熔接点靠输出光纤一侧切斜角, 角度大于 8° , 其目的是消除端面菲涅尔反射, 防止回光干扰谐振腔稳定工作, 从而提高系统长期运行的可靠性。系统输出功率由功率计测量。

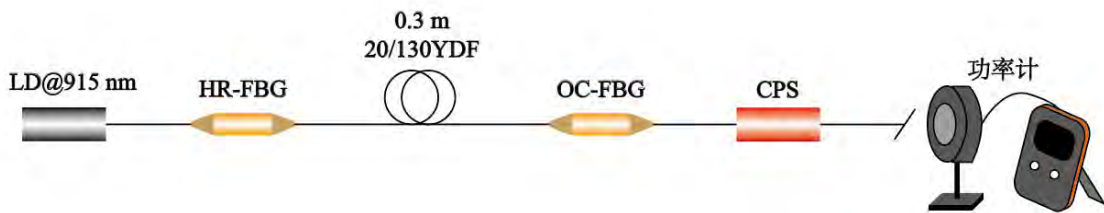


图 16 980 nm 光纤激光器整体结构

Fig.16. Overall structure of 980 nm fiber laser

该系统输出功率随泵浦功率的变化曲线如图 17 所示。系统在泵浦功率为 10.11 W 时达到阈值并开始出光, 此时输出功率为 0.51 W; 当泵浦功率提升至 68.5 W 时, 最大输出功率 P_0 达到 9.35 W。经计算, 该激光器的斜率效率约为 15.15%, 光-光转换效率约为 13.65%。

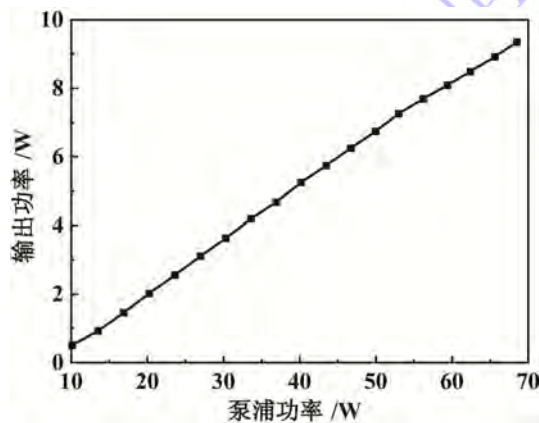


图 17 980 nm 光纤激光器输出功率与泵浦功率的关系

Fig.17. The relationship between output power and pump power of a 980 nm fiber laser

将自制的 MFA 接入上述激光器系统，集成后的完整系统结构如图 18 所示。在 MFA 的输出端，与上文同样方式切割斜角以抑制回光，使用相同功率计测量输出功率。

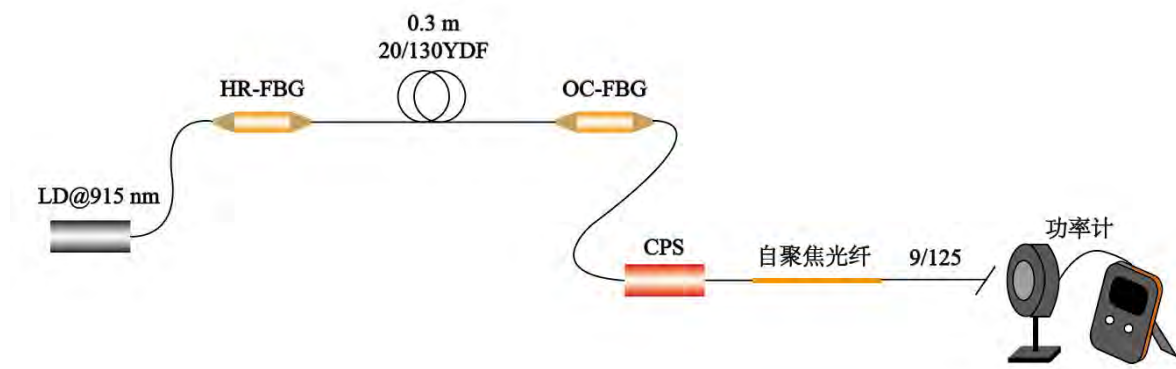


图 18 MFA 插入损耗测试系统整体结构

Fig.18. Overall structure of MFA insertion loss testing system

将多个按相同工艺制备的自制 MFA 依次接入系统进行测试，分别记录输出功率并通过式(6)计算其引入的插入损耗。将高功率激光器系统中测得的损耗与此前在低功率单模泵浦测试系统中获得的结果进行对比，数据汇总于表 4。

表 4 两系统 MFA 插入损耗对比

Table 4. Comparison of insertion loss between two systems of MFA

976 nm 单模泵浦系统损耗/dB	光纤激光器系统损耗/dB
0.36	0.78
0.39	0.41
0.29	0.44
0.22	0.34
0.31	0.52

从对比结果可知，MFA 在完整高功率激光器系统中表现出的插入损耗，普遍略高于在低功率单模泵浦测试系统中的测量值。这一差异可能源于高功率运转时激

光腔内模式更为复杂，少量高阶模或更复杂的模场分布被激发，导致通过 MFA 时的耦合效率略有下降。在此条件下，性能最优的一个 MFA 获得了 0.34 dB 的插入损耗。接入该 MFA 后，激光器系统的输出功率曲线如图 19 所示，其阈值泵浦功率仍为 10.11 W，此时输出 0.37 W；在 68.5 W 泵浦下，输出功率 P_1 为 8.65 W。通过式(6)计算得到该 MFA 损耗约为 0.34dB，并计算得到此状态下系统的斜率效率约为 14.18%，光-光效率约为 12.63%。

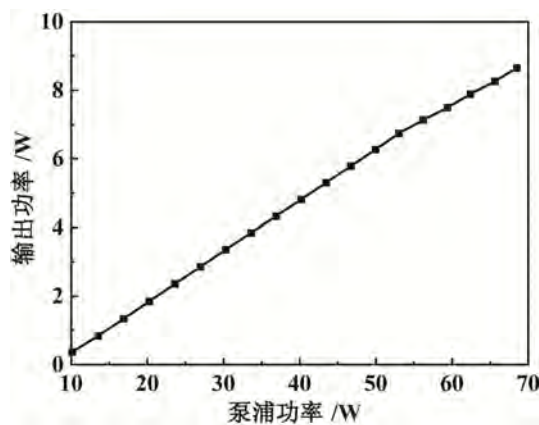


图 19 损耗最低 MFA 接入光纤激光器系统输出功率与泵浦功率的关系

Fig.19. The relationship between output power and pump power after integrating the MFA with the lowest loss into a fiber laser system

目前市面上尚无同时满足 980 nm 工作波段、20/130 μm 输入光纤、9/125 μm 输出光纤的商用 MFA。为客观评估本方案的技术水平，选用商用 MFA 进行性能对比。该商用 MFA 的产品编码为 MFA-D01-S00-20-0-1.5/1.5-A，工作波长 1000 nm~1100 nm，位于 980 nm 波段附近，输入光纤采用与本研究相同的 20/130 μm 规格，输出端为 Hi1060 光纤。商家提供的 MFA 测试报告显示，在波长 1064 nm、功率 1 mW 下损耗为 0.45 dB。

在相同系统中，将自制 MFA 替换为商用 MFA，重复测量步骤并计算，得到其在 980 nm 工作条件下的插入损耗为 0.76 dB，系统斜率效率降至约 12.71%，光-光效率降至约 11.43%。该商用 MFA 输出为 Hi1060 光纤，自制 MFA 输出为 9/125

μm 光纤，二者规格虽不相同，但在 980 nm 光纤激光器作为 EDFA 泵浦源的应用中，Hi1060 与 9/125 μm 单模光纤均为连接 EDFA 的常用光纤类型，因此将两者置于同一应用背景下进行性能参照具有实际意义。实测结果表明，相较于商用器件，自制 MFA 的损耗降低幅度超过 50%，系统效率优势明显，显著提升了泵浦耦合的整体性能，充分证明了该自制 MFA 在真实应用场景下的有效性与实用性。

5 结 论

本文成功设计并验证了一种基于自聚焦光纤与热扩芯协同优化的 980 nm 波段模场适配器。通过仿真与实验，严格证实了自聚焦光纤长度选择公式 $L=n\cdot P+0.5P$ ($n\geq 1$) 的普适性，并利用热扩芯技术补偿了工艺引起的残余模场失配，将器件插入损耗显著降低。最终，将优化后的自制 MFA 集成至自主搭建的高亮度 980 nm 光纤激光器系统中进行验证。未接入 MFA 时，系统斜率效率为 16.07%，光-光效率为 13.65%。接入性能最优的自制 MFA 后，系统仍保持高效运行，斜率效率为 14.18%，光-光效率为 12.63%，MFA 自身在真实高功率工况下的插入损耗最低可达 0.34 dB。在相同系统中，实测插损 0.76dB 的商用 MFA 使系统斜率效率降至约 12.71%，光-光效率降至 11.43%。相较于商用器件，自制 MFA 的损耗降低幅度超过 50%，系统效率优势明显，显著提升了泵浦耦合的整体性能。该结果不仅验证了方案的正确性与实用性，也为高亮度光纤激光器的泵浦耦合提供了一种有效的器件解决方案。

参考文献

[1] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, Hanna D C 1997 *IEEE J. Quantum Electron*

- [2] Augst S J, Goyal A K, Aggarwal R L, Fan T Y, Sanchez A 2002 *Conference on Lasers at Electric-Optics* Long Beach, CA, USA, May 24—24, 2002 p594
- [3] Lim H, Ilday F Ö, Wise F W 2002 *Opt. Express* **10** 1497
- [4] Huang X J, Liu Y Z, Sui Z, Li M Z, Lin H H, Wang J J, Zhao D S, Chen H Y 2004 *High Power Laser Part. Beams* (**12**) 1531 (in Chinese) [黄绣江, 刘永智, 隋展, 李明中, 林宏兔, 王建军, 赵德双, 陈海燕 2004 强激光与粒子束 (**12**) 1531]
- [5] Bouchier A, Lucas-Leclin G, Georges P, Maillard J M 2005 *Opt. Express* **13** 6974
- [6] Soh D B S, Codemard C, Wang S, Nilsson J, Sahu J K, Laurell F, Philippov V, Jeong Y, Alegria C, Baek S 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1032
- [7] Chen M N, Cao J Q, Huang Z H, Chen J B 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 223 (in Chinese) [陈毛妮, 曹润秋, 黄值河, 陈金宝 2021 中国激光 **48** 223]
- [8] Yeh C-H, Lee C-C, Chi S 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1637
- [9] Lu Y, Chu P L, Alphones A, Shum P 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1640
- [10] Hanna D C, Percival R M, Perry I R, Smart R G, Suni P J, Tropper A C 1990 *J. Mod. Opt.* **37** 517
- [11] Zenteno L A, Minelly J D, Dejneka M, Crigler S 2000 *OSA Trends Opt. Photon.* **34** 616
- [12] Li W, Matniyaz T, Gafsi S, Kalichevsky-Dong M T, Hawkins T W, Parsons J, Gu G, Dong L 2019 *Opt. Express* **27** 24972
- [13] Tian Y, Lin Z Q, Jiang H W, Cheng X, Feng Y 2023 *Fourteenth International Conference on Information Optics and Photonics* Xi'an, China, August 7—10, 2023 p678
- [14] Luo Y H, Liang H Y, Ju W, Chen J J, Lin X F, Qiu Q, Zhang Z L, Wang X L, Xing

- Y B, Dai N L, Li J Y 2024 *Opt. Fiber Technol.* **89** 104054
- [15] Luo Y H, Liang H Y, Ju W, Shu C, Cheng J J, Yin X K, Li W Z, He L, Li H Q, Peng J G, Xing Y B, Dai N L, Li J Y 2025 *Opt. Laser Technol.* **190** 113159
- [16] Chen M, Du H, Cao J, Liu A, Pan Z, Huang Z, Chen J 2021 *Quantum Electron.* **51** 976
- [17] Yu Y, An Y Y, Cao J Q, Guo S F, Xu X J 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 398
- [18] Chen M N, Cao J Q, Liu A M, Huang Z H, Pan Z Y, Chen Z L, Chen J B 2021 *Results Phys.* **29** 104784
- [19] Chen M N, Cao J Q, Liu A M, Huang Z H, Pan Z Y, Chen Z L, Chen J B 2021 *Opt. Lett.* **46** 5340
- [20] Leich M, Jäger M, Grimm S, Hoh D, Jetschke S, Becker M, Hartung A, Bartelt H 2014 *Laser Phys. Lett.* **11** 045102
- [21] Zhou X F 2012 *M.S. Thesis* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [周旋风 2012 硕士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [22] Li K, Xue J W, Su B H, Dong M, Zhang W, Lv H J 2016 *Opt. Tech.* **42** 450 (in Chinese)[李坤, 薛竣文, 苏秉华, 东苗, 张韦, 吕海娟 2016 光学技术 **42** 450]
- [23] Yang L B 2022 *M.S. Thesis* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [杨林博 2022 硕士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [24] Xiong F, Mu W, Wang Y, Ma Y L, Xu C L, Zhang Q, Zhang X B 2024 *Acta Photonica Sinica* **53** 8 (in Chinese) [熊峰, 慕伟, 王洋, 马云亮, 徐呈霖, 张琦, 张小贝 2024 光子学报 **53** 8]
- [25] Zhang T, Wang Z J, Li Q N 2025 *J. Qiqihar Univ.* **(1)** 79 (in Chinese) [张韬, 王治

Mode field adapter for 980 nm band based on graded-index optical fiber

Liang Hao-Yuan Luo Yong-Hui Zhang Yu-Shuo Chen Mo Chen Dong-Xu He Le Xing

Ying-Bin Peng Jing-Gang Dai Neng-Li[†] Li Jin-Yan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430070, China)

Abstract

High-power 980 nm fiber lasers, serving as ideal pump sources for erbium-doped fiber amplifiers (EDFA), face a critical challenge in efficiently coupling light from large-mode-area (LMA) fibers (typically 20/130 μm) to standard single-mode fibers (SMF). The significant mismatch in mode field diameter (MFD) between these fibers results in severe coupling losses, often exceeding 0.7 dB for commercial mode field adapters (MFA) operating in the 980 nm band. To address this issue, we propose and demonstrate a novel MFA based on the synergistic optimization of a multi-period graded-index optical fiber (GIOF) and thermally expanded core (TEC) technology.

The proposed MFA employs a precisely designed GIOF to achieve deterministic periodic beam focusing, enabling mode field transformation from large to small dimensions within a fixed physical length. The optimal length of the GIOF is determined by the formula $L=nP+0.5P(n\geq 1)$, where P is the self-imaging period. To compensate for residual mode field mismatch caused by fabrication tolerances, the receiving 9/125 μm SMF is subjected to thermal core expansion treatment using a CO_2 laser, which controllably enlarges its MFD to better match the output field of the GIOF.

The optimized MFA is fabricated and integrated into a home-built 980 nm

fiber laser system for validation. The bare laser system exhibits a slope efficiency of 15.15% and an optical-to-optical efficiency of 13.65% at an output power of 9.35 W. With the proposed MFA inserted, the system maintains stable operation with a slope efficiency of 14.18% and an optical-to-optical efficiency of 12.63%, corresponding to a minimum MFA insertion loss of 0.34 dB. For comparison, based on a typical commercial MFA insertion loss of 0.76 dB in the same band, the system efficiency would theoretically drop to approximately 13.2% (slope efficiency) and 11.43% (optical-to-optical efficiency). The proposed MFA reduces the insertion loss by over 50% compared to commercial counterparts and significantly mitigates the system efficiency penalty.

This work provides an effective and reliable device solution for high-brightness 980 nm fiber laser pumping, demonstrating the potential of combining GIOF and TEC technologies for high-performance mode field management in high-power fiber laser systems.

Keywords: Mode field adapter, 980 nm fiber laser, graded-index optical fiber, fiber thermal

expansion core

录用稿件，非最终出版稿