

一种基于反谐振结构的三能级掺钕激光光纤设计*

许海琛 付士杰[†] 田浩 盛泉 史伟[‡] 姚建铨

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2024年4月3日收到; 2024年5月27日收到修改稿)

900 nm 掺钕光纤激光器可广泛应用于生物医学诊断、激光检测和光谱分析等领域。钕离子在 1060 nm 波段四能级跃迁的增益竞争, 严重限制了 900 nm 三能级掺钕光纤激光器输出功率的提升。本文设计了一种纤芯直径为 27 μm 的大模场掺钕实芯双层反谐振光纤, 用于产生高功率 900 nm 激光。通过在有源光纤中引入双层反谐振单元结构, 并对光纤结构参数和折射率分布进行优化, 模拟结果表明光纤在 880—913 nm 波段基模损耗小于 0.1 dB/m, 高阶模式损耗大于 10 dB/m, 同时在 1060 nm 波段所有模式损耗达到 100 dB/m。本文提出的掺钕实芯反谐振光纤在 900 nm 高功率光纤激光器和放大器等领域具有广泛的应用前景。

关键词: 实芯反谐振光纤, 掺钕光纤, 大模场面积光纤, 单模光纤**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Dp, 47.11.Fg**DOI:** 10.7498/aps.73.20240463

1 引言

900 nm 光纤激光器在生物医学诊断、激光雷达探测和生物光谱分析等领域具有广泛应用^[1-3], 通过倍频技术得到的蓝光激光可应用于水下通信、激光显示、光学数据存储及高分辨率三维光刻等领域^[4-8]。Nd³⁺基于⁴F_{3/2}→⁴I_{9/2}能级之间的辐射跃迁可以实现 900 nm 波段的三能级激光输出, 但受限于 Nd³⁺在 1060 nm 波段四能级跃迁(⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2})的增益竞争, 900 nm 掺钕光纤激光器输出功率无法得到有效提升。2004年, Daniel等^[9]将 14 m 的 W 型光纤作为增益介质, 研制了一种 908—938 nm 波长可调谐的高功率掺钕铝硅酸盐光纤激光器, 激光器最大输出功率为 2.4 W, 斜率效率为 41%。当 W 型光纤内包层厚度和折射率满足一定条件时, 会表现出长波长截止的特性, 因此可以作为增益介质来抑制 Nd³⁺在 1060 nm 波段的放大自发辐射, 但 W 型光纤要求对光纤折射率进行精确设计且模

场面积有限, 难以实现激光功率的进一步提升; 2006年, Wang等^[10]通过自制的光子带隙光纤来抑制 Nd³⁺的四能级激光跃迁, 在 907 nm 获得了最大输出功率为 225 mW 的掺钕光纤激光器, 斜率效率为 32%。通过调整包层中空气孔的周期性排布, 光子带隙光纤可以在波长域实现滤波效果, 但其通常采用空间耦合结构, 不利于激光系统的全光纤化。

近年来, 实芯反谐振光纤 (SC-ARF) 因具有大模场面积、宽传输带宽等特点得到广泛关注, 在高功率光纤激光产生方面具有潜在的应用前景^[11-15]。光波导中发生谐振和反谐振的不同条件使得反谐振光纤在波长域表现出周期性的传输损耗变化规律, 因而反谐振光纤在波长域具有滤波特性, 用来实现目标激光波长单模低损耗传输, 并抑制其他波段光的传输。此外, 不同于空芯反谐振光纤, SC-ARF 能够在纤芯之中掺杂 Er³⁺, Yb³⁺, Nd³⁺等稀土离子, 用来设计应用于高功率光纤激光器和放大器的增益光纤。2021年, Xing等^[16]理论上提出了一种非均匀反谐振单元的 SC-ARF, 可实现在

* 国家自然科学基金 (批准号: 62375201, 62105240, 62075159, 61975146, 62275190)、天津大学自主创新基金 (批准号: 2023XPD0020) 和山东省重点研发计划 (批准号: 2020CXGC010104, 2021CXGC010202) 资助的课题。

[†] 通信作者. E-mail: shijie_fu@tju.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: shiwei@tju.edu.cn

1064 nm 处基模模场面积为 $1430 \mu\text{m}^2$ 的单模激光传输; 同年, 该团队报道了一种双层反谐振单元的 SC-ARF^[17], 其中内外层反谐振单元沿纤芯中点同轴排布, 在保证光纤单模传输特性的前提下, 该结构将 1064 nm 处的模场面积进一步提升到 $7481 \mu\text{m}^2$; 2023 年, He 等^[18] 基于硫系玻璃光纤首次实验制备了大模场面积 SC-ARF, 该光纤可用于 4.5—7.5 μm 波段的中红外激光传输, 但受限于 S-H, As-H, H_2O , CS_2 等杂质在前述波长范围内存在高损耗吸收带的影响, 光纤最低传输损耗为 7 dB/m. 需指出的是, 以上工作均是针对无源 SC-ARF 开展的理论和实验研究, 未考虑纤芯区域掺杂稀土离子的有源 SC-ARF. 2022 年, Goel 等^[19] 设计了一种应用于三能级 976 nm 激光产生的掺镱 SC-ARF, 通过调节单层反谐振单元结构参数, 在 $3630 \mu\text{m}^2$ 的大模场面积下光纤仍能保证单模传输, 但该工作设定有源纤芯区域和背景区域折射率完全相同, 忽略了二者折射率差对模式损耗特性的影响, 而实现不同组分玻璃折射率完全相同在实际光纤制备过程中则具有较大难度. 当纤芯区域与背景区域存在折射率差的条件下, 反谐振光纤的模式束缚能力将出现下降. 因此, 如何在有效抑制 1060 nm 附近四能级跃迁的同时保持 900 nm 激光低损耗、单模传输是本文设计大模场掺钕反谐振光纤的主要出发点.

基于反谐振光纤的滤波特性, 本文设计了一种纤芯直径为 $27 \mu\text{m}$ 的掺钕实芯双层反谐振光纤 (Nd-DL-SC-ARF), 通过在有源光纤中引入交叉排布的双层反谐振单元结构增强对有源纤芯区域模式损耗特性的控制能力, 结合不同反谐振单元结构参数及光纤折射率分布的优化设计, 实现了光纤在 880—913 nm 波段基模损耗小于 0.1 dB/m, 高阶模损耗大于 10 dB/m, 同时在 1060 nm 波段所有模式损耗高达 100 dB/m. 该光纤既保证了 900 nm 激光大模场、低损耗单模传输, 又能有效抑制 1060 nm 波段的放大自发辐射, 在 900 nm 高功率光纤激光技术领域具有广泛的应用前景.

2 光纤设计与优化

2.1 光纤结构设计

本文使用全矢量有限元法结合优化的网格尺寸对光纤的传输特性和模式分布进行了理论分析, 光纤中不同模式的限制损耗 (confinement loss,

CL) 可以表示为

$$\text{CL} = 8.686k_0\text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (1)$$

其中 k_0 为波矢量, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为模式有效折射率的虚部. 图 1 为本文所设计的 Nd-DL-SC-ARF 结构示意图, 光纤玻璃基质为硅酸盐玻璃, 通过调节玻璃基质组分可对光纤不同区域的折射率进行调控, 其中有源纤芯区域为 Nd^{3+} 掺杂区域, 折射率为 $n_1 = 1.45$, 直径为 $d_c = 27 \mu\text{m}$; 无源背景区域折射率为 $n_2 = 1.4505$; 此处设定的纤芯与背景区域折射率差值能够在当前激光玻璃制备技术下得以实现^[20,21]. 双层反谐振单元区域由内外两层交叉排布的毛细管构成, 折射率均为 $n_3 = 1.48$, 图 2 为基模 (LP_{01} 模式) 在 900 nm 和 1060 nm 处限制损耗随毛细管壁厚 t 的周期性变化规律, 其中 t 的取值范围为 1—4 μm , 据此, 选取反谐振毛细管厚度 $t = 2.1 \mu\text{m}$, 该壁厚既可以保证 900 nm 激光处于反谐振区域、能够实现低损耗传输, 又使得 1060 nm 激光位于光纤的谐振区域、能够用来抑制 Nd^{3+} 在 1060 nm 处四能级跃迁的增益竞争. 内层毛细管外壁和纤芯相切, 内径为 d_1 , 外层毛细管外壁与外包层区域、纤芯区域的距离分别为 T_1 , T_2 , 内径为 d_2 ; 外包层区域折射率为 n_4 , 厚度为 t_1 , 可选取丙烯酸树脂、聚酰亚胺等低折射率复合物材料. 关于 d_1 , d_2 , T_1 , T_2 等参数的优化选取会在 2.2 节详细介绍.

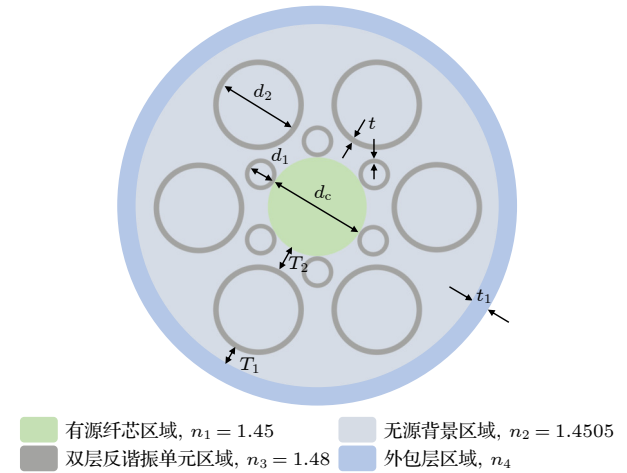


图 1 掺钕实芯双层反谐振光纤结构示意图
Fig. 1. Cross-section of the Nd-DL-SC-ARF.

2.2 实芯双层反谐振光纤结构参数优化

本节主要通过优化光纤 d_2/d_c , d_1/d_c , T_1 , T_2 等结构参数, 降低 900 nm 波段基模损耗, 提高高阶模式损耗, 以实现 900 nm 波段基模光低损耗、单模传输的目标.

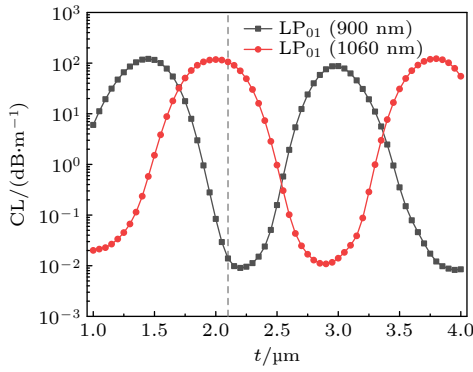


图 2 LP_{01} 模式在 900 nm 和 1060 nm 处的限制损耗随反谐振毛细管厚度 t 的变化

Fig. 2. CLs of LP_{01} at 900 nm and 1060 nm as a function of the thickness of anti-resonant tubes t .

图 3 为 900 nm 处 LP_{01} , LP_{11} 模式的限制损耗以及对应的高阶模抑制比 (HOMER) 随内外层毛细管内径与纤芯直径比例 d_1/d_c , d_2/d_c 的变化规律. 其中, 高阶模抑制比为损耗最低的高阶模式 LP_{11} 模和基模 LP_{01} 模的限制损耗之比, 该值越大, 光纤的单模传输性能越强; d_1/d_c 的变化范围为 0.1—0.2, d_2/d_c 的变化范围为 0.7—0.9. 如图 3(a) 所示, 当 d_1/d_c 在 0.1—0.12 范围内时, 对应的内层毛细管尺寸较小, 毛细管之间的较大空隙导致纤芯基模泄漏、损耗较高. 此外, 内层毛细管尺寸的改变导致包层模式有效折射率发生变化, 当包层模式

和纤芯模式的有效折射率接近时会发生模式耦合, 图 3(b) 为 $d_1/d_c = 0.12$ 以及 $d_1/d_c = 0.2$ 时 LP_{01} 模式的模场分布图 (对应图 3(a) 中虚线区域), 此时 LP_{01} 模式和位于内层毛细管壁的包层模式发生耦合, 导致纤芯模式损耗增加. 当 d_1/d_c 取 0.13—0.19 时, LP_{01} 模式能够有效限制在纤芯中, 光纤满足基模低损耗传输的要求. 如图 3(a), (c) 所示, 当 d_2/d_c 取 0.89 和 0.77 时, LP_{01} 模式和 LP_{11} 模式分别表现出高损耗特性, 图 3(d) 中高阶模抑制比也在 $d_2/d_c = 0.77$ 时取得最大值, 这同样源于纤芯与包层管之间的模式耦合. 为验证这一点, 数值分析了 900 nm 处 LP_{01} , LP_{11} , CM (cladding mode) 三种模式的有效折射率以及 LP_{01} , LP_{11} 模式的损耗随 d_2/d_c 的变化情况, 结果如图 4 所示 (固定 $d_1/d_c = 0.16$), 其中, 图 4(b) 插图 of d_2/d_c 取 0.77 和 0.89 时, LP_{11} 模式和 LP_{01} 模式的模场分布图. 由图 4(a) 可知, LP_{01} , LP_{11} 模式的有效折射率随 d_2/d_c 增大基本不变, 而 CM 的有效折射率随 d_2/d_c 增大逐渐增大. 在 d_2/d_c 分别取 0.77 和 0.89 时, CM 和 LP_{11} , LP_{01} 模式的有效折射率曲线相交, 此时, 如图 4(b) 所示, LP_{11} , LP_{01} 模式与 CM 耦合最强、模式损耗最高. 因此选取 $d_1/d_c = 0.16$, $d_2/d_c = 0.77$ 以满足 900 nm 基模低传输损耗、 LP_{11} 模式高传输损耗的光纤设计要求.

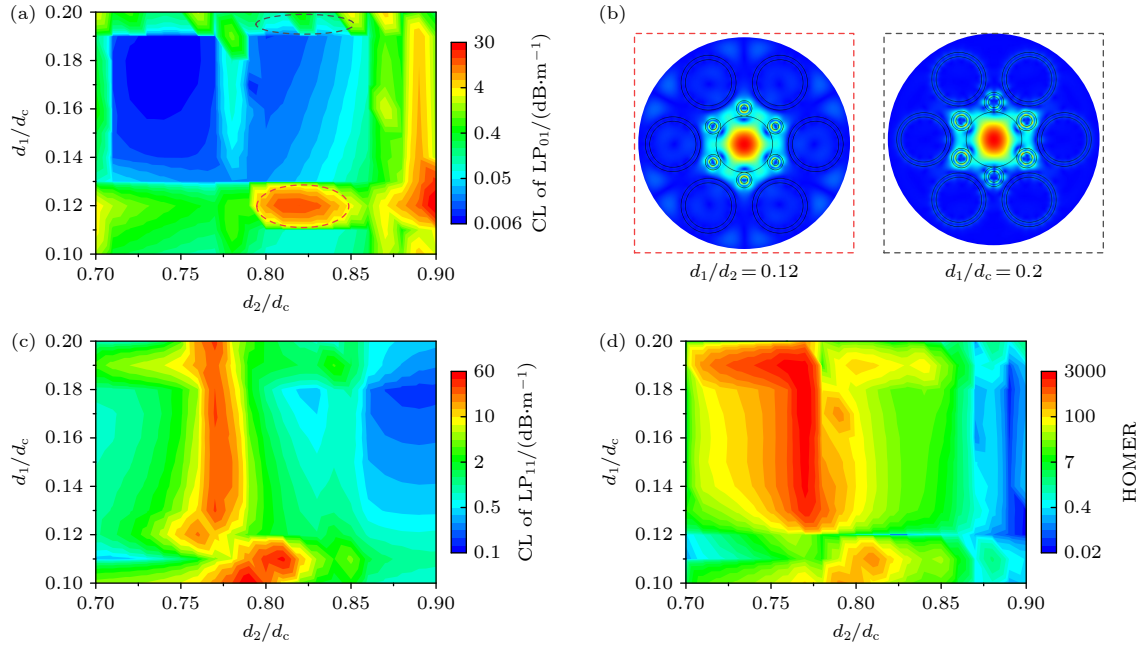


图 3 d_1/d_c , d_2/d_c 对于光纤在 900 nm 处限制损耗的影响 (a) LP_{01} 模式损耗; (b) $d_1/d_c = 0.12$ 和 $d_1/d_c = 0.2$ 时, LP_{01} 模式的模场分布图 ($d_2/d_c = 0.82$); (c) LP_{11} 模式损耗; (d) 高阶模抑制比

Fig. 3. The influence of d_1/d_c and d_2/d_c on fiber CLs at 900 nm: (a) CL of LP_{01} ; (b) mode field distributions of LP_{01} when $d_1/d_c = 0.12$ and $d_1/d_c = 0.2$ ($d_2/d_c = 0.82$); (c) CL of LP_{11} ; (d) HOMER.

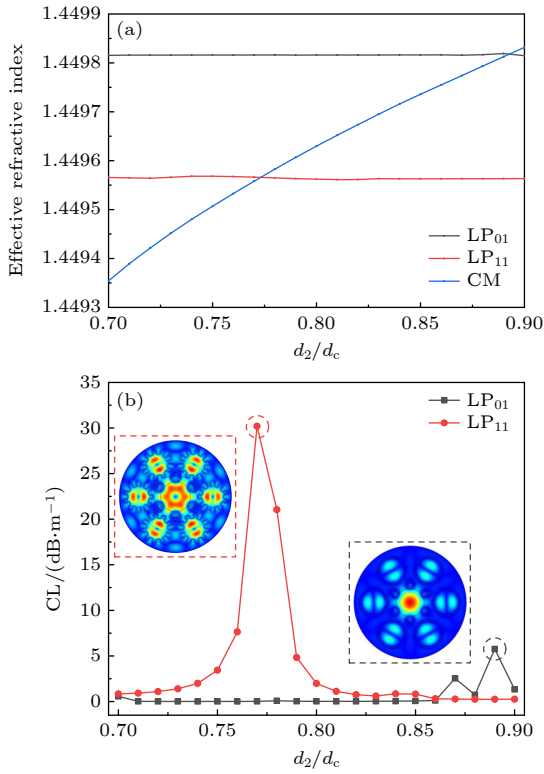


图4 900 nm处不同模式有效折射率和损耗随 d_2/d_c 变化情况 (a) LP₀₁, LP₁₁, CM 模式的有效折射率; (b) LP₀₁, LP₁₁ 模式的限制损耗, 插图为 LP₀₁ ($d_2/d_c = 0.89$), LP₁₁ ($d_2/d_c = 0.77$) 的模场分布图

Fig. 4. The influence of d_2/d_c on effective refractive index and CLs of different modes at 900 nm: (a) Effective refractive index of LP₀₁, LP₁₁ and CM; (b) CLs of LP₀₁ and LP₁₁, insets are the mode field distributions of LP₀₁ ($d_2/d_c = 0.89$) and LP₁₁ ($d_2/d_c = 0.77$).

同理, 分析了 900 nm 处 LP₀₁, LP₁₁ 模式的限制损耗以及高阶模抑制比随 T_1 和 T_2 的变化趋势, 结果如图 5 所示, 其中, T_1 的变化范围为 3—7 μm , T_2 的变化范围为 5—9 μm . 如图 5(a) 所示, 当 T_1 取 5—5.5 μm , T_2 取 7—7.5 μm 时, LP₀₁ 模式表现为较低的限制损耗, 约为 0.01 dB/m; 当 T_2 取值过大时, 内外层毛细管之间的间隙增大促进了基模泄漏, 导致损耗增大, 因此在图 5(a) 的右上角会出现 LP₀₁ 模式高损耗区域. 如图 5(b) 所示, 不同于基模的损耗变化情况, T_1 和 T_2 对 LP₁₁ 模式损耗影响较小, LP₁₁ 模式的损耗大小主要与外层毛细管尺寸 d_2/d_c 有关(如图 4 所示). 如图 5(c) 所示, 高阶模抑制比与 LP₀₁ 模式的损耗变化趋势相对应, 高阶模抑制比取值高的区域对应 LP₀₁ 模式损耗较低的区域. 因此, 选取 $T_1 = 5 \mu\text{m}$, $T_2 = 7.5 \mu\text{m}$ 以满足 900 nm 处基模低传输损耗、高阶模式高传输损耗的要求.

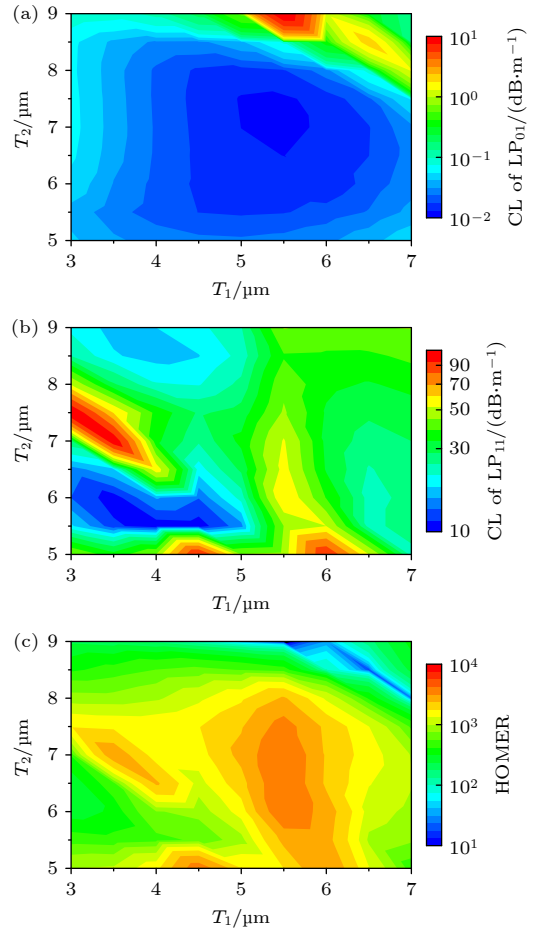


图5 T_1 和 T_2 对光纤在 900 nm 处限制损耗的影响 (a) LP₀₁ 模式损耗; (b) LP₁₁ 模式损耗; (c) 高阶模抑制比
Fig. 5. The influence of T_1 and T_2 on fiber CLs at 900 nm: (a) CL of LP₀₁; (b) CL of LP₁₁; (c) HOMER.

结合前述优化参数, 分析 Nd-DL-SC-ARF 在 850—1100 nm 波长范围内 LP₀₁—LP₃₁ 模式的损耗变化, 结果如图 6(a) 所示, 在 880—913 nm 波段, LP₀₁ 模式损耗均小于 0.1 dB/m, 其余高阶模式损耗均大于 10 dB/m, 在 1060 nm 波段所有模式损耗均达到 100 dB/m, 表明所设计光纤可以用于实现 900 nm 波段 LP₀₁ 模式单模、低损耗传输. 图 6(b) 为所设计的有源光纤在 900 nm 和 1060 nm 处 LP₀₁—LP₃₁ 模式的模场分布图, 此时光纤在 900 nm 处的基模模场面积为 361 μm^2 . 需要指出的是, 当前所设计的有源单模光纤模场面积虽然高于商用掺铒光纤, 为 900 nm 波段几十瓦甚至上百瓦的单模光纤激光产生提供了光纤设计方案, 但相比于引言部分介绍的大模场光纤在模场面积上仍存在一定的差距. 这主要是由于有源光纤纤芯和背景区域不可避免的折射率差导致纤芯模式泄漏^[14], 从而引起基模传输损耗的增大. 这一现象随着纤芯

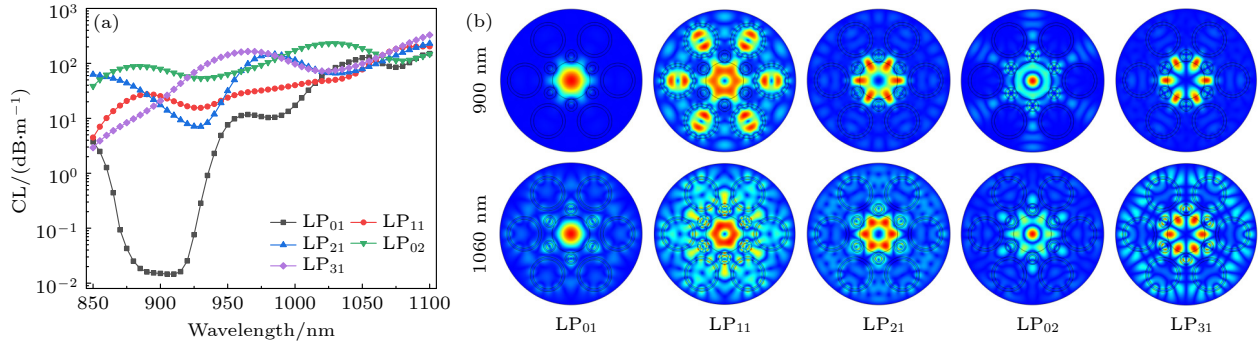


图6 掺钕实芯双层反谐振光纤的滤波特性 (a) 850—1100 nm 波段 LP₀₁—LP₃₁ 模式的损耗变化; (b) 900 nm 和 1060 nm 处 LP₀₁—LP₃₁ 模式的模场分布图

Fig. 6. Filter characteristics of Nd-DL-SC-ARF: (a) CLs of LP₀₁ to LP₃₁ modes in the 850–1100 nm band; (b) mode field distributions of LP₀₁ to LP₃₁ modes at 900 nm and 1060 nm.

尺寸增大更加严重, 从而限制了光纤的模场面积. 进一步的光纤模场面积提升仍需设计新型反谐振结构^[22–24], 加强对纤芯区域 900 nm 基模光的限制能力、降低大模场光纤下 900 nm 基模光的限制损耗.

3 结 论

基于交叉排布的双层反谐振单元结构, 本文设计了一种纤芯直径为 27 μm 的 Nd-DL-SC-ARF, 该结构可以实现 880—913 nm 波段基模损耗小于 0.1 dB/m, 高阶模式损耗大于 10 dB/m, 1060 nm 波段所有模式损耗达到 100 dB/m, 从而既可保证 900 nm 激光单模低损耗传输和高功率放大, 又可有效抑制 1060 nm 波段的放大自发辐射, 所设计光纤在 900 nm 高功率掺钕光纤激光器和放大器领域具有广泛的应用潜力. 通过合理地选取光纤参数及折射率分布, 该结构也可以用于掺镱、铒、铥实芯反谐振光纤的设计. 目前发展较为成熟的化学气相沉积技术以及堆叠控制技术可以用于 Nd-DL-SC-ARF 的制备^[16]. 为实现所设计光纤的光学性能, 实验制备过程中需对反谐振单元尺寸的一致性、纤芯和背景区域的玻璃组分进行精确控制. 而光纤可承受的激光功率主要受限于激光玻璃和光纤制备过程中可能引入的结构缺陷和杂质损耗等因素, 高功率下的非线性效应是提升该光纤尺寸下的激光功率需考虑的另一因素.

参考文献

[1] Drobizhev M, Makarov N S, Tillo S E, Hughes T E, Rebane A 2011 *Nat. Methods* **8** 393
 [2] Fix A, Ehret G, Löhring J, Hoffmann D, Alpers M 2011 *Appl.*

Phys. B-Lasers O. **102** 905
 [3] Nölleke C, Raab C, Neuhaus R, Falke S 2018 *J. Mol. Spectrosc.* **346** 19
 [4] Bartolacci C, Laroche M, Gilles H, Girard S, Robin T, Cadier B 2010 *Opt. Express* **18** 5100
 [5] Leconte B, Gilles H, Robin T, Cadier B, Laroche M 2018 *Opt. Express* **26** 10000
 [6] Fang Q, Xu Y, Fu S J, Shi W 2016 *Opt. Lett.* **41** 1829
 [7] Bode M, Freitag I, Tünnermann A, Welling H 1997 *Opt. Lett.* **22** 1220
 [8] Hohmann J K, Renner M, Waller E H, von Freymann G 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1488
 [9] Soh D B S, Yoo S, Nilsson J, Sahu J K, Oh K, Baek S, Jeong Y, Codemard C, Dupriez P, Kim J, Philippov V 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 1275
 [10] Wang A, George A K, Knight J C 2006 *Opt. Lett.* **31** 1388
 [11] Goel C, Yoo S, Chang W K 2023 *Results Phys.* **49** 106491
 [12] Tian H, Fu S J, Sheng Q, Xu H C, Zhang S, Shi W, Yao J Q 2023 *Results Phys.* **46** 106281
 [13] Tian H, Fu S J, Xu H C, Li J H, Yao Z D, Zhang J X, Shi C D, Sheng Q, Shi W, Yao J Q 2024 *Opt. Laser Technol.* **171** 110443
 [14] Zhang X, Gao S F, Wang Y Y, Ding W, Wang P 2021 *High Power Laser Sci. Eng.* **9** 1
 [15] Zhang S, Sun S, Sheng Q, Shi W, Yan Z B, Tian H, Yao J Q 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 1137
 [16] Xing Z, Wang X, Lou S Q, Tang Z J, Jia H Q, Gu S, Han J H 2021 *Opt. Lett.* **46** 1908
 [17] Xing Z, Wang X, Gu S, Lou S Q 2021 *Results Phys.* **29** 104700
 [18] He L L, Liang Y C, Gu Y N, Gu Z X, Xia K L, Wang X S, Dai S X, Shen X, Liu Z J 2023 *Opt. Express* **31** 8975
 [19] Goel C, Yoo S 2022 *Opt. Lett.* **47** 1045
 [20] Jain D, Jung Y, Barua P, Alam S, Sahu J K 2015 *Opt. Express* **23** 7407
 [21] Jain D, Alam S, Jung Y, Barua P, Velazquez M N, Sahu J K 2015 *Opt. Express* **23** 28282
 [22] Zhang Z, Li Y, Guo Y, Chen D, Liu Z, Zhang Z 2023 *International Conference on Optical and Networks*, Qufu, China, July 31–August 3, 2023 p1
 [23] Huang S W, Ye J W, Xu Y, Li J P, Fu S N, Wang Y C, Qin Y W 2023 *Opt. Commun.* **530** 129208
 [24] Sun T R, Su X Y, Meng F C, Wang Z N, Song J L, Zhang C L, Xu T J, Zhang Y H, Zhang H W, Cui M D, Zheng Y 2023 *Micromachines* **14** 1198

Design of three-level Nd-doped laser fiber based on anti-resonant structure*

Xu Hai-Chen Fu Shi-Jie[†] Tian Hao Sheng Quan
Shi Wei[‡] Yao Jian-Quan

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 3 April 2024; revised manuscript received 27 May 2024)

Abstract

900-nm Nd-doped fiber laser can find widespread applications including biomedical diagnosis, laser detection, and spectral analysis. The four-level gain competition of Nd³⁺ around 1060 nm severely constrains the laser power scaling of the 900-nm three-level Nd-doped fiber laser. In this work, we propose a large-mode-area Nd-doped double-layer solid-core anti-resonant fiber with a core diameter of 27 μm for generating a high-power 900-nm laser based on the resonant and anti-resonant conditions of anti-resonant fiber. The transmission properties and mode profiles of the designed fiber are analyzed theoretically by using the full-vector finite-element method combined with an optimized mesh size. By introducing the double-layer anti-resonant elements into the active fiber and optimizing the fiber structure parameters and refractive index distribution, the high-order modes are well coupled with cladding modes. Finally, the designed fiber exhibits a confinement loss below 0.1 dB/m for fundamental mode and the confinement losses of all high-order modes are greater than 10 dB/m in 880–913 nm band. More importantly, around 1060 nm, the confinement losses of all modes can reach up to 100 dB/m, which enables the designed Nd-doped fiber to effectively suppress parasitic lasing and even amplified spontaneous emission. The Nd-doped solid-core anti-resonant fiber proposed in this study shows broad application prospects in the fields of 900-nm high-power fiber laser and amplifier. The developed chemical vapor deposition process combined with stack-and-draw technology can be adopted for the fabrication of the designed fiber. In order to ensure the optical performance of the anti-resonant fiber, it is necessary to accurately control the thickness of all anti-resonant tubes, the glass composition of the active core and background area in actual fabrication.

Keywords: solid-core anti-resonant fiber, Nd-doped fiber, large-mode-area fiber, single-mode fiber

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 47.11.Fg

DOI: 10.7498/aps.73.20240463

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62375201, 62105240, 62075159, 61975146, 62275190), the Seed Foundation of Tianjin University, China (Grant No. 2023XPD-0020), and the Key R&D Program of Shandong Province, China (Grant Nos. 2020CXGC010104, 2021CXGC010202).

[†] Corresponding author. E-mail: shijie_fu@tju.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: shiwei@tju.edu.cn



一种基于反谐振结构的三能级掺钕激光光纤设计

许海琛 付士杰 田浩 盛泉 史伟 姚建铨

Design of three-level Nd-doped laser fiber based on anti-resonant structure

Xu Hai-Chen Fu Shi-Jie Tian Hao Sheng Quan Shi Wei Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 144205 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240463

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240463>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三层芯结构在单模大模场面积低弯曲损耗光纤中的应用和分析

Application and analysis of three-layer-core structure in single-mode large-mode-area fiber with low bending loss

物理学报. 2021, 70(22): 224214 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210410>

窄带空芯反谐振光纤的制备及其模式转换应用研究

Preparation and mode conversion application of narrowband hollow-core anti-resonant fiber

物理学报. 2022, 71(13): 134207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212194>

太赫兹双芯反谐振光纤的设计及其耦合特性

Design and coupling characteristics of terahertz dual-core anti-resonant fiber

物理学报. 2020, 69(20): 208703 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200662>

一种具有低串扰抗弯曲的单沟槽十九芯单模异质光纤

A kind of single trench 19-core single-mode heterogeneous fiber with low crosstalk and anti-bending performance

物理学报. 2022, 71(10): 104206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212221>

二氧化钒相变对太赫兹反谐振光纤谐振特性的影响及其应用

Effect of phase transition of vanadium dioxide on resonance characteristics of terahertz anti-resonant fiber and its applications

物理学报. 2021, 70(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210084>

基于M型掺镱光纤的近单模2 kW光纤放大器

Near-single-mode 2-kW fiber amplifier based on M-type ytterbium-doped fiber

物理学报. 2022, 71(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211751>