

激光与光电子学进展

新型内包层形状对掺铥双包层光纤吸收效率的影响研究

王郡婕*, 王成, 杨艳妮, 过阳阳

西安医学院医学技术学院物理教研室, 陕西 西安 710021

摘要 为进一步提高掺铥双包层光纤(DCF)激光器的输出功率,从提高 DCF 对泵浦光的吸收效率出发,数值模拟了具有不同纤芯直径和内包层形状的 DCF 的泵浦吸收特性。模拟结果表明,对于具有不同纤芯直径的新型内包层 DCF,随着反射次数的增加,其泵浦吸收效率趋于 100%;对于具有不同内包层形状的 DCF,新型内包层 DCF 的泵浦吸收效率最高。实验中,选择正六边形内包层和新型内包层掺铥 DCF 为工作物质,两种掺铥 DCF 激光器的输出功率分别为 13.2 W 和 14.8 W,斜率效率分别为 31% 和 35%。新型内包层掺铥 DCF 激光器的输出功率比正六边形内包层掺铥 DCF 激光器提高了 12.1%,这表明新型内包层 DCF 更有利于实现高效的泵浦吸收。

关键词 光纤光学; 光纤性质; 新型内包层; 掺铥光纤; 吸收效率

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1706009

Study on the Effect of New Inner Cladding Shape on Absorption Efficiency of Thulium-Doped Double-Clad Fiber

Wang Junjie*, Wang Cheng, Yang Yanni, Guo Yangyang

Physics Teaching and Research Section, Medical Technology College, Xi'an Medical University,
Xi'an, Shanxi 710021, China

Abstract In order to improve the output power of thulium-doped double-clad fiber (DCF) lasers, starting from optimizing the absorption efficiency of DCF to the pump light, pump absorption characteristics of fibers with different core diameters and inner cladding shapes are numerically simulated. The simulation results show that the pump absorption efficiency tends to 100% when the reflection times increased for the new inner clad DCFs with different core diameters. For DCFs with different inner cladding shapes, the absorption efficiency of the new inner cladding DCF is the highest. In the experiment, regular hexagonal inner cladding thulium-doped DCF and new inner cladding thulium-doped DCF are selected as the working substances. The output power of the two thulium-doped DCF lasers is 13.2 W and 14.8 W, respectively. The slope efficiency of the two thulium-doped DCF lasers is 31% and 35%, respectively. The output power of the new inner cladding thulium-doped DCF laser is 12.1% higher than that of regular hexagon inner cladding thulium-doped DCF laser, which indicates that the new inner cladding DCF is more conducive to achieve efficient pump absorption.

Key words fiber optics; fiber properties; new inner cladding; thulium-doped fiber; absorption efficiency

OCIS codes 060.2400; 060.2390; 060.3510

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-16; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划(19JK0760)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-514)

通信作者: *610282564@qq.com

1 引言

双包层光纤(DCF)的问世解决了大功率泵浦光无法耦合进单模纤芯的问题。DCF激光器凭借效率高、模式质量高、结构紧凑、易于散热等优点备受研究者们青睐^[1-5]。掺铥DCF激光器可输出中心波长为2 μm的激光,该激光不仅对人眼安全,在生物组织切割和疼痛神经刺激研究领域还具有独特的优势^[6-9]。但实现中心波长为2 μm的掺铥DCF激光器的高功率输出一直是该激光器发展的瓶颈,为了提高光纤对泵浦光的吸收效率,除了需要选择有效的散热装置外,还必须选择较好的掺杂光纤结构。研究显示:若DCF内包层截面是圆形,当纤芯处于圆心时,泵浦光在内包层中易形成螺旋光,这将导致纤芯的泵浦吸收效率十分低,但偏心DCF的制作过程又难以控制^[10-13]。故实验中大多采用非圆形内包层形状来提高DCF的泵浦吸收效率,并且用单位长度DCF的泵浦吸收效率来衡量不同内包层的优劣^[14-15]。

本文数值模拟了具有不同纤芯直径的新型内包层DCF的泵浦吸收特性和具有不同内包层形状的DCF的泵浦吸收特性。模拟结果显示,对于不同纤芯直径的新型内包层DCF,当反射次数增加时,泵浦吸收效率可接近100%;对于不同内包层形状的DCF,圆形和偏心型DCF的泵浦吸收效率较低,正六边形和新型内包层DCF的泵浦吸收效率较高。实验中,选择正六边形内包层和新型内包层掺铥DCF为工作物质,两种掺铥DCF激光器的输出功率分别为13.2 W和14.8 W,斜率效率分别为31%和35%。新型内包层掺铥DCF激光器的输出功率比正六边形内包层掺铥DCF激光器提高了12.1%,这表明新型内包层DCF更有利于实现高效的泵浦吸收。此外,在要求激光器输出功率相同的情况下,选用泵浦吸收效率高的光纤,所需使用的光纤长度大大减小,这样不仅可以节省成本,还有利于降低高功率光纤激光和放大器中的非线性效应。

2 新型内包层DCF吸收效率的数值模拟

新型内包层DCF是基于激光技术中非稳腔概念的一种光纤结构,这种新颖内包层形状的DCF更有利于高功率激光输出,其结构如图1所示。以内

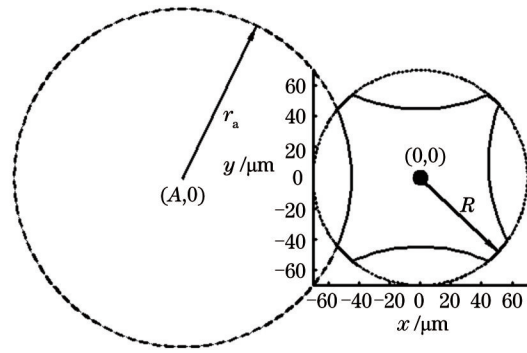


图1 新型内包层模型图

Fig. 1 Diagram of new inner cladding model

包层的中心为原点建立平面直角坐标系,内包层中四个大圆弧的曲率半径分别为 r_b, r_c, r_d ,其圆心坐标分别为 $(A,0), (0,B), (C,0), (0,D)$,四个圆心到坐标原点的距离分别为 $|A|, |B|, |C|, |D|$;四个小圆弧的半径为 R ,圆心为 $(0,0)$ 。

设光线从 $P(x_i, y_i)$ 点以 β 角方向入射至曲面,如图2所示。根据光线在曲面上的入射点 Q 及该点处法线方向(α 角方向),可知反射光线的方向 β_{new} 为

$$\beta_{\text{new}} = 2\alpha + \pi - \beta. \quad (1)$$

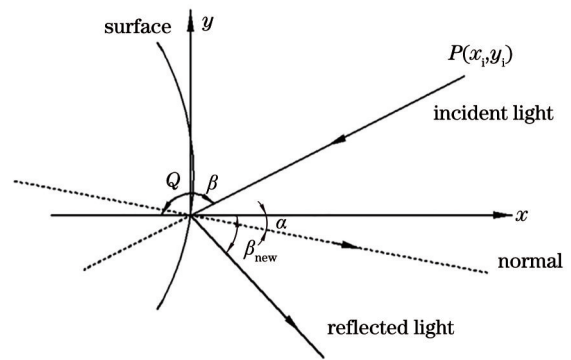


图2 光线在任意曲面的反射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light reflection on arbitrary surface

过 $P(x_i, y_i)$ 点且以 β 角方向入射的光线可表示为:

$$y - y_i = (x - x_i) \tan \beta. \quad (2)$$

故该光线和光纤中心的距离 d 为

$$d = \frac{y_i - x_i \tan \beta}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta}}, \quad (3)$$

当 d 小于纤芯半径时,纤芯吸收泵浦光;若不满足该条件,泵浦光则在内包层中反射直至被内包层吸收。

图3为具有不同纤芯直径的新型内包层DCF

的泵浦吸收特性。横轴表示反射次数 N , 纵轴表示泵浦吸收效率。对于 $|A|=|B|=|C|=|D|=300\ \mu\text{m}$, $r_a=r_b=r_c=r_d=250\ \mu\text{m}$, $R=70\ \mu\text{m}$ 的新型内包层, 当纤芯直径分别为 $12\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 时, 数值模拟了经过 N 次反射后入射至纤芯的光线占总光线的百分比曲线。可以发现, 随着反射次数的增加, 被纤芯吸收的泵浦光越来越多。纤芯直径不同, 意味着纤芯和内包层的面积比不同, 此时各纤芯的泵浦吸收特性也不同。当反射次数 $N=50$ 时, 对于直径为 $12\ \mu\text{m}$ 的纤芯, 有约 97% 的光入射至纤芯; 而对于直径为 $8\ \mu\text{m}$ 的纤芯, 有 92% 的光进入纤芯。但随反射次数的增加, 两者的泵浦吸收情况趋于一致, 经过 100 次反射后, 几乎所有光都能入射至纤芯中。

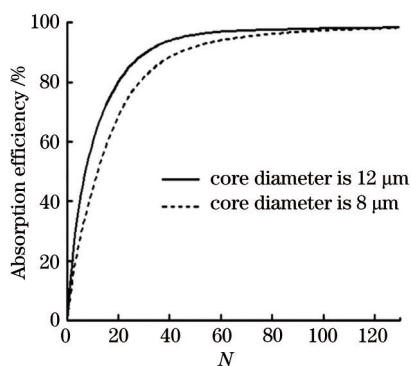


图 3 具有不同纤芯直径的新型内包层 DCF 的泵浦吸收特性
Fig. 3 Pump absorption characteristics of new inner cladding DCFs with different core diameters

对于泵浦面积为 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$, 纤芯直径为 $8\ \mu\text{m}$ 的内包层, 数值模拟了不同内包层形状对泵浦吸收特性的影响, 如图 4 所示。可以看出, 对于圆形内包层 DCF, 泵浦吸收效率仅有 10%, 90% 的

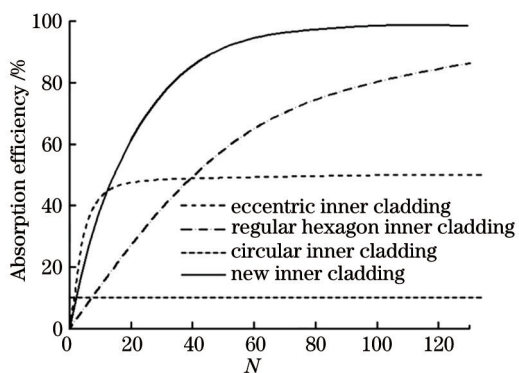


图 4 具有不同内包层形状 DCF 的泵浦吸收特性
Fig. 4 Pump absorption characteristics of DCFs with different inner cladding shapes

泵浦光是在内包层中来回反射的螺旋光。对于偏心型内包层 DCF, 反射次数 $N=50$ 时, 有约 48% 的泵浦光进入纤芯, 相比于圆形内包层有了明显的改善, 但内包层中仍存在超过 50% 的螺旋光。与偏心型内包层 DCF 不同, 随着反射次数的增多, 正六边形内包层 DCF 的泵浦吸收效率在提高, 当 $N=50$ 时, 有 58% 的泵浦光进入纤芯; 当 $N=100$ 时, 有 80% 的泵浦光进入纤芯。但当反射次数继续增多时, 仍有 13% 的泵浦光无法入射至纤芯。而对于新型内包层, 当 $N=50$ 时, 就有高达 92% 的泵浦光进入纤芯; 当 $N=100$ 时, 有 99% 的泵浦光进入纤芯, 这是非常高的泵浦吸收效率。

因此, 在实验中选择新型内包层 DCF 将有利于实现高效的泵浦吸收。在要求激光器输出功率相同的情况下, 选用泵浦吸收效率高的光纤, 所需使用的光纤长度大大减小, 这样不仅可以节省成本, 还有利于降低高功率光纤激光和放大器中的非线性效应。

3 掺铈 DCF 激光器实验

基于以上数值模拟结果, 在实验中分别选择正六边形内包层和新型内包层掺铈 DCF 作为工作物质, 实验装置如图 5 所示。

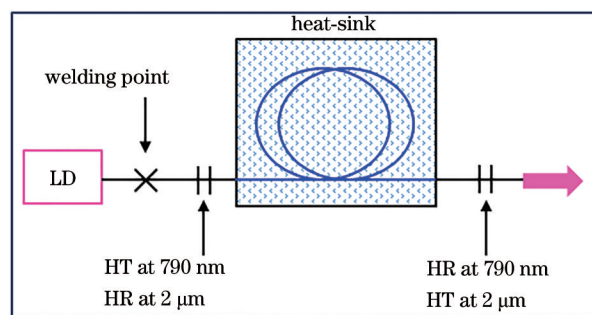


图 5 实验装置图

Fig. 5 Diagram of experimental equipments

采用带尾纤输出的激光二极管 (LD) 作为泵浦源, 其中心波长为 $790\ \text{nm}$ 。将光纤布拉格光栅 (FBG) 作为谐振腔, 前腔镜对中心波长为 $790\ \text{nm}$ 的泵浦光高透 (HT)、对中心波长为 $2\ \mu\text{m}$ 的激光高反 (HR); 后腔镜对中心波长为 $790\ \text{nm}$ 的泵浦光高反、对中心波长为 $2\ \mu\text{m}$ 的激光高透。工作物质为正六边形内包层 DCF 时, 光纤长度为 $15\ \text{m}$, 光纤掺杂浓度 (质量分数) 为 4%, 纤芯直径为 $6\ \mu\text{m}$, 纤芯数值孔径为 0.22, 内包层的直径为 $125\ \mu\text{m}$, 内包层的数值孔径为 0.48。采用的新型内包层 DCF 的光纤长

度和光纤掺杂浓度与正六边形内包层 DCF 相同, $|A| = |B| = |C| = |D| = 300 \mu\text{m}$, $r_a = r_b = r_c = r_d = 250 \mu\text{m}$, $R = 60 \mu\text{m}$, 纤芯直径为 $8 \mu\text{m}$ 。两者光纤纤芯均位于内包层的对称中心, 这样有利于耦合时与其他光纤的熔接。实验中采用光纤熔接机对光纤端面进行剥离、清洁、切割后, 依次将泵浦源尾纤与 FBG1、DCF、FBG2 进行熔接。泵浦源尾纤与 FBG1 及正六边形 DCF 熔接时, 三者直径均为 $125 \mu\text{m}$, 熔接过程产生的损耗估计值为 0 dB ; 泵浦源尾纤与 FBG1 及与新型内包层 DCF 熔接时, 损耗值为 6.72 dB 。

图 6 为泵浦源温度为 20°C 时, 泵浦功率与泵浦电流之间的关系。可以看出, 阈值功率为 0.5 W , 且泵浦功率随泵浦电流的增大呈线性增长趋势。实验中选用的泵浦电流的最大值为 50 A , 此时的泵浦功率为 42.6 W 。

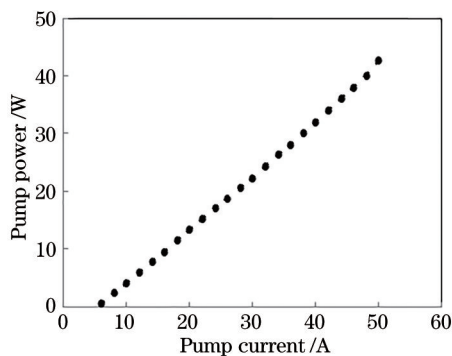


图 6 当泵浦源温度为 20°C 时, 泵浦电流与泵浦功率的关系
Fig. 6 Relationship between pump current and pump power when temperature of pump source is 20°C

图 7 为掺铥 DCF 激光器的泵浦电流与输出功率的关系。可以发现, 输出功率随泵浦电流的增大而增大, 阈值功率约为 0.05 W 。在泵浦电流为 50 A 的情况下, 当采用正六边形内包层时, 掺铥

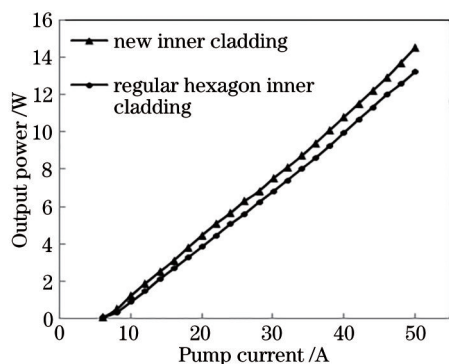


图 7 掺铥 DCF 激光器的泵浦电流与输出功率的关系
Fig. 7 Relationship between pump current and output power of thulium-doped DCF laser

DCF 激光器的输出功率为 13.2 W , 斜率效率为 31% ; 当采用新型内包层时, 掺铥 DCF 激光器的输出功率为 14.8 W , 斜率效率为 35% 。后者输出功率较前者提高了 12.1% , 这表明新型内包层 DCF 有利于实现高效的泵浦吸收。

4 结 论

数值模拟了具有不同纤芯直径的新型内包层 DCF 和具有不同内包层形状的 DCF 的泵浦吸收特性。模拟结果表明, 泵浦光耦合进新型内包层 DCF 后, 对于同一内包层但不同纤芯直径的 DCF, 随着反射次数的增加, 泵浦吸收效率可接近 100% ; 对于不同内包层形状的 DCF, 反射次数 $N=50$ 时, 圆形内包层 DCF 的泵浦吸收效率仅有 10% , 且随反射次数的增加变化不大; 偏心型内包层 DCF 的泵浦吸收效率为 48% ; 正六边形内包层 DCF 的泵浦吸收效率为 58% , 且随着反射次数的增加, 其泵浦吸收效率可达 80% ; 新型内包层 DCF 的泵浦吸收效率最高, 其泵浦吸收效率可达 99% 。实验中, 选择正六边形内包层和新型内包层掺铥 DCF 为工作物质, 两种掺铥 DCF 激光器的输出功率分别为 13.2 W 和 14.8 W , 斜率效率分别为 31% 和 35% 。综上所述, 新型内包层 DCF 有利于实现高效的泵浦吸收。在要求激光器输出功率相同的情况下, 选用泵浦吸收效率高的光纤, 所需使用的光纤长度大大减小, 这样不仅可以节省成本, 还有利于降低高功率光纤激光和放大器中的非线性效应。

参 考 文 献

- [1] Bai Y, Yan F P, Feng T, et al. Ultra-narrow-linewidth fiber laser in $2 \mu\text{m}$ band using saturable absorber based on PM-TDF[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0101003.
白燕, 延凤平, 冯亭, 等. 基于保偏掺铥光纤饱和吸收体的 $2 \mu\text{m}$ 波段超窄线宽光纤激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0101003.
- [2] Zhang D. The research of Tm-doped fiber laser and the optical fiber amplifier[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
张丹. 掺铥光纤激光器及放大器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [3] Zhang N. Research on structure and characteristics of thulium doped fiber laser[J]. Journal of Beijing Union University, 2018, 32(2): 55-60.
张宁. 掺铥光纤激光器结构与特性研究[J]. 北京联合

- 大学学报, 2018, 32(2): 55-60.
- [4] Tian Y, Xu S Q, Huang F F, et al. Research progress of rare earth doped fluorophosphate glass fiber for 2-3 μm fiber laser application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170608.
田颖, 徐时清, 黄飞飞, 等. 面向 2~3 μm 光纤激光应用的稀土掺杂氟磷酸盐玻璃光纤的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170608.
- [5] Si X Y, Huang H T, Qian L J, et al. Research progress on thulium-doped sesquioxide ceramic lasers in 2 μm wavelength region[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 090001.
司晓云, 黄海涛, 钱丽娟, 等. 2 μm 波段掺铥倍半氧化物陶瓷激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 090001.
- [6] Xing Y B, Ye B Y, Jiang Z W, et al. Development of high efficiency Tm^{3+} -doped fiber and Tm^{3+} -doped fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014209.
邢颖滨, 叶宝圆, 蒋作文, 等. 高效率掺 Tm^{3+} 双包层光纤及光纤激光器的研制[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014209.
- [7] Chen Y L, Zhu X L, Zhang J X, et al. Development of pulsed single-frequency 2 μm all-solid-state laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050006.
陈忆兰, 朱小磊, 张俊旋, 等. 单频 2 μm 波段全固态脉冲激光器技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050006.
- [8] Zhang L, Qin L, Zhang J, et al. New type all fiber double cladding fiber laser[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(1): 34-36, 39.
张亮, 秦莉, 张键, 等. 新型全光纤结构双包层光纤激光器[J]. 半导体光电, 2005, 26(1): 34-36, 39.
- [9] Zhang C L. Study on novel high-power cladding-pumped fiber laser[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
张春林. 新型高功率包层泵浦光纤激光器的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [10] Ma H X. Absorption efficiency of double-clad fiber based on Zemax[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(1): 182-187.
马海霞. 基于 Zemax 分析双包层光纤吸收效率的新方法[J]. 应用光学, 2013, 34(1): 182-187.
- [11] Sun X X, Tian P F. Research on the factors of absorption efficiency of double-clad fiber[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2011(1): 10-12.
孙欣欣, 田鹏飞. 双包层光纤吸收效率影响因素的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2011(1): 10-12.
- [12] Wang Y. Research on absorption efficiency of double cladding fiber laser[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
王彦. 双包层光纤激光器中吸收效率的研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [13] Wang Z H, Zhang H, Xu S. Calculation of the absorption efficiency for double clad fiber by using modal analysis method[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(11): 1321-1323.
王子华, 张辉, 徐晟. 双包层光纤激光器泵浦吸收效率的模场计算方法[J]. 光子学报, 2004, 33(11): 1321-1323.
- [14] Zheng J J, Ning T G, Wang Q. Analysis of the influence of inner cladding shape on absorption efficiency of double cladding fiber[J]. Photon Technology, 2005(4): 190-192, 196.
郑晶晶, 宁提纲, 王圻. 双包层光纤内包层形状对吸收效率的影响分析[J]. 光子技术, 2005(4): 190-192, 196.
- [15] He W. Study on absorption efficiency of defect inner-cladding double-cladding fiber lasers[D]. Shanghai: Shanghai University, 2007.
何伟. 缺陷型内包层双包层光纤激光器吸收效率研究[D]. 上海: 上海大学, 2007.