

双包层光纤激光器中包层光的滤除

王文亮 冷进勇 郭少锋 曹涧秋 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 双包层光纤激光器的输出性能及稳定性与包层光的滤除程度有关。光纤激光器输出光中的剩余抽运光不仅会影响输出光的单色性,还会对输出设备造成损害,甚至破坏光学器件。通常在内包层外涂一种高折射的导光胶来滤除包层光,但此方法使包层光在较短的长度内被大量地滤除,导致热沉上功率密度较高,给散热带来较大的压力。实验中采用 3 种不同折射率的导光胶,分步滤除包层光,减小局部温度过高。采用 Zemax 和 Matlab 软件研究了此滤除方式的特点,搭建了验证实验系统。实验结果表明,输出激光中的包层光已被滤除,滤除效果可达到 20 dB,且热量分布均匀,不会引起局部温度过高。

关键词 光纤光学;高功率光纤激光器;双包层光纤;包层光

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s102004

Research on Cladding Light Stripping in Double-Cladding All-Fiber Laser

Wang Wenliang Leng Jinyong Guo Shaofeng Cao Jianqiu Jiang Zongfu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The output performance and stability of double-cladding all-fiber laser are both affected by the ability of stripping cladding light. The removing pump light will influence the monochromaticity and beam quality of fiber laser, cause damage to the output device and even damage optical device. The common method is recoating the double-cladding fiber (DCF) with a high index gel, which strips the cladding light quickly within the first few millimeters and makes the heat locally concentrated. A method using a group of gels to strip the cladding light is adopted. The commercial software Zemax and Matlab are used to simulate the stripping progress of cladding light, and an experimental verification system is presented. The results indicate that the proposed method can strip the cladding light gradually over the length of the fiber with an attenuation ability of 20 dB, and the thermal distribute is uniform without local temperature too high.

Key words fiber optics; high power fiber lasers; double-cladding fiber; cladding light

OCIS codes 060.2300; 060.3510; 140.3510

1 引 言

光纤激光器由于具有抽运阈值功率低、散热性好、易实现单模运转、结构简单、成本低等特点,在光通信、光传感、先进加工、生物医学等领域得到了广泛的应用,已成为固体激光器的一个重要发展方向^[1~6]。

在双包层全光纤激光器中,信号光在纤芯和包层的界面上发生全反射被束缚在纤芯中;抽运光在内包层和外包层的界面上发生全反射,多次透过纤芯,从而被纤芯吸收。但是在实际中,由于光纤的弯曲和熔接等原因,部分信号光会泄露到包层中;同时也存在一些抽运光在内包层中螺旋传输,不被纤芯

收稿日期: 2012-01-01; **收到修改稿日期**: 2012-03-01

作者简介: 王文亮(1986—),男,博士研究生,主要从事大功率光纤激光器方面的研究。

E-mail: wangwenliang123@yahoo. cn

导师简介: 姜宗福(1963—),男,博士,教授,主要从事高能激光技术与应用、光束控制与气动光学、物理光学等方面的研究。E-mail: jiangzongfu@yahoo. com. cn

吸收或者吸收不充分,使得激光器输出光中包括一定量的包层光。如果输出光中的包层光不及时滤除,不仅会影响到输出光的光束质量与单色性,还会对输出设备造成损害,甚至破坏光学器件,例如准直器,它直接关系到高功率激光器是否安全、稳定地运行。所以有必要采取一定的技术滤除多余的抽运光。

空间结构的光纤激光器一般采用二色镜法滤除多余的抽运光,但此方法不能够滤除包层中的信号光,也不便于集成^[7]。文献[3]提出光纤内包层外涂上高折射率的匹配胶滤除包层光的方法,但此方法包层光在较短长度内就大量地被滤出转化为热,造成局部温度过高,不利于散热。文献[8]提出对光纤内包层由 400 μm 腐蚀细化到 125 μm 滤除包层光的方法,但此方法使内包层受到损坏,且腐蚀度不易控制。为了使包层光能够均匀地在较长一段距离滤除,从而热量分布均匀以便于散热,本文采用 3 种不同折射率的导光胶,分步滤除包层光,减小局部温度过高。并且搭建了验证实验系统,实验结果表明,输出激光中的包层光已被滤除,达到 20 dB,且热量分布均匀,不会引起局部温度过高。

2 双包层光纤激光器输出光中的包层光

激光器输出光中的包层光主要有 3 个来源:一是激光腔中激发的包层模式以及放大自发辐射(ASE);二是未被吸收的抽运光;三是由于光纤的弯曲和熔接等原因,部分信号光会泄露到包层中形成包层光。

实际的阶跃型双包层光纤是由纤芯、有限厚度的内包层、外包层及涂覆层组成,形成三层圆均匀光波导。由于内包层与外包层之间的折射率差引起的模式,通常称为包层模式。包层模式并不是只存在于包层的模式,它的能量也分布于纤芯,实际上它就

是纤芯的高阶模,如果包层的损耗很小,它无疑可以传输很远的距离^[9]。

抽运光在内包层和外包层的界面上发生全反射,多次透过纤芯,从而被纤芯吸收。但由于对抽运光的吸收不充分,或者一部分抽运光在内包层中螺旋传输,不被纤芯吸收,使得激光器输出光中包括一定量的剩余抽运光,从而影响激光器的输出质量。

在实际中,光纤的弯曲是难以避免的。由于光纤的弯曲、不完美熔接以及光纤端面的反射等原因,会使部分信号光泄漏进入包层中,形成包层光。图 1 给出了两例不完美熔接的情况:图 1(a)是由于光纤端面不平整造成的;图 1(b)是由于光纤纤芯没对准造成的。

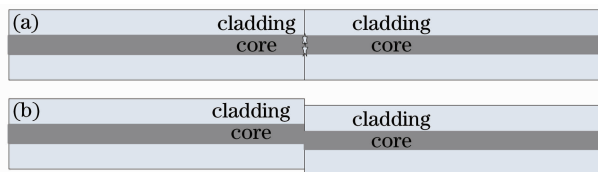


图 1 两例不完美的熔接情况。(a)光纤端面不平整;
(b)纤芯没对准

Fig. 1 Two imperfect splices. (a) Fiber ends with bad disposal; (b) cores misaligned

3 包层光滤除方案及仿真分析

激光器输出光中的包层光,可使用包层光剥离器来滤除。下面利用 Zemax 软件中的非序列光线追迹模块的蒙特卡洛模拟方法,设计并仿真包层光剥离器对包层光的滤除性能。如图 2 所示:抽运光经耦合透镜,入射到双包层光纤的内包层中;内包层直径为 400 μm ,数值孔径 0.46,折射率为 1.45;纤芯直径为 20 μm ,数值孔径 0.06;光纤中间一部分被特殊处理为包层光剥离器,用于滤除包层光;通过光纤的光能量由探测器来测量,探测器的位置可以由 Matlab 通过 Zemax 软件中的动态数据交换(DDE)功能来控制。

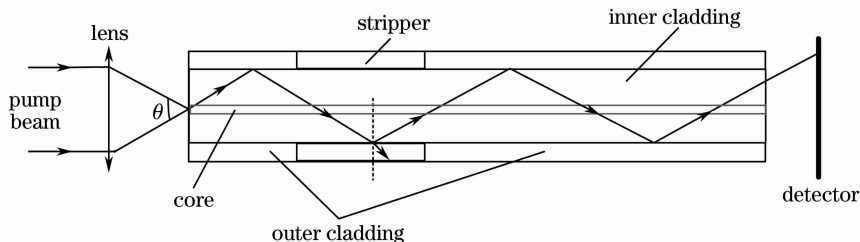


图 2 Zemax 中的仿真模型图

Fig. 2 Simulation sketch in the Zemax

3.1 涂上 1 种导光胶的方案

阶跃型光纤的数值孔径 (NA) 的物理意义是：能使光在光纤内以全反射形式进行传播的接收角之正弦值，它表征了光纤的集光能力，对应的临界角，通称为孔径角。光纤对抽运光的束缚力由内包层折射率 n_2 与外包层折射率 n_3 差的大小决定。折射率差别越大，数值孔径越大，光纤的集光能力也就越强。滤除内包层中的包层光可以通过剥除外包层与涂覆层，在内包层上涂覆一定折射率的导光胶，从而实现抽运光的滤除。假设入射抽运光的能量为 1，图 3 给出了剩余抽运光功率与导光胶折射率 n_g 的关系，这里假设导光胶将其能够滤除的包层光全部滤除。结果表明，当导光胶的折射率越大时，滤除的包层光越多。因此，为了提高包层光的损耗，一般采用折射率大于内包层的导光胶。

分别以折射率为 1.4、1.44 和 1.56 的导光胶为例，利用 Zemax 软件所设计的仿真模型，得到包层

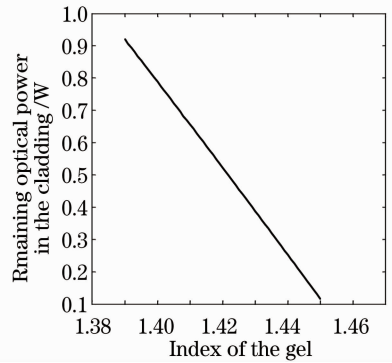


图 3 剩余抽运光功率与导光胶折射率的关系
Fig. 3 Relationship between the remaining optical power in the cladding and the index of the gel

光剥离器中不同位置包层光的剩余量，如图 4 所示。然而从图 4(c) 结果中可以看出，大量的抽运光在导光胶较短长度 (约为 2 mm) 内就被大量滤除，从而造成包层光剥离器的局部温度过高，不利于散热，甚至会引起光纤损坏。

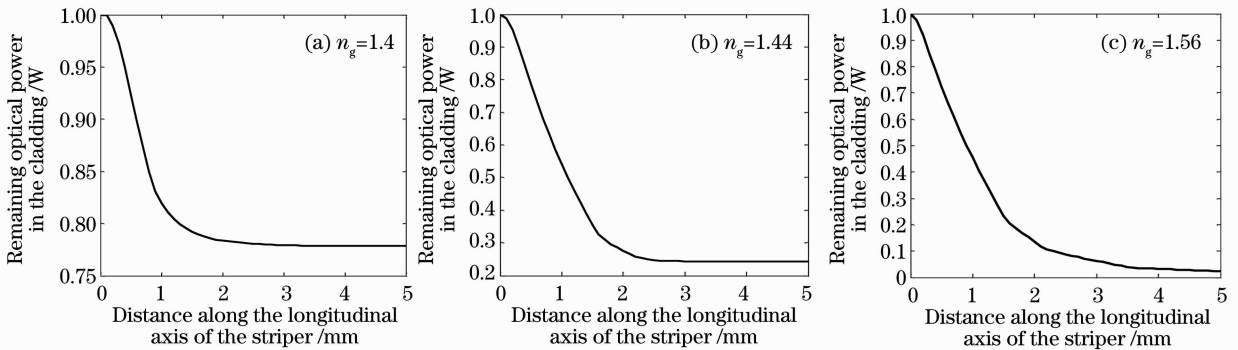


图 4 导光胶折射率不同时，剩余抽运光功率与沿包层光剥离器轴向分布
Fig. 4 Remaining optical power in the cladding along the stripper

3.2 涂上 3 种导光胶的方案

为了使包层光能够均匀地在较长一段距离滤除，从而热量分布均匀以便于散热，采用 3 种不同折射率的导光胶，分步滤除包层光，减小局部的温度过高。3 种导光胶的折射率分别为 1.41、1.43 和 1.56，长度分别为 5 mm。利用 Zemax 软件所设计的仿真模型，得到包层光剥离器中不同位置包层光的剩余量，如图 5 所示。

从图 5 中可以看出，抽运光在光纤轴向分布滤除，不会造成包层光剥离器的局部温度过高，利于散热。

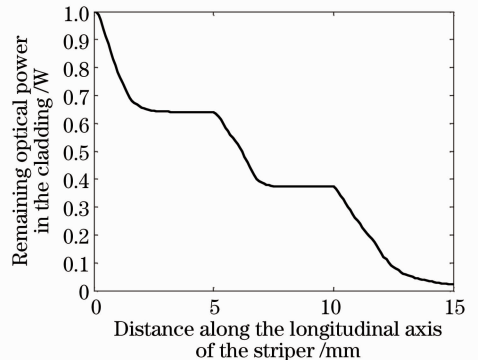


图 5 使用 3 种导光胶时，剩余抽运光功率与沿包层光剥离器轴向分布

Fig. 5 Remaining optical power in the cladding along the stripper with three gels

4 包层光滤除实验及分析

实验装置如图 6 所示。实验采用 Nufern 提供的双包层光纤，长约 1 m。光纤参数为：内包层直径为 400 μm ，数值孔径 0.36；纤芯直径为 20 μm ，数值孔

径 0.06。两个 LD 发出的光通过合束器进入上述双包层光纤，此光纤中部 10 cm 的长度，被剥除外包层与涂覆层，涂覆上导光胶，光纤输出端 8° 角处理。

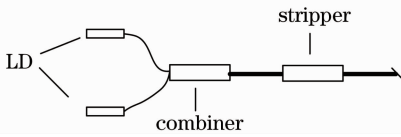


图 6 验证实验示意图

Fig. 6 Setup of the experimental verification system

实验中,首先改变 LD 的电流,测量经过合束器的功率 P_1 ;然后合束器后熔接上自制的包层光剥离器,测量输出功率 P_2 ,并用热像仪测量包层光剥离器的最高温度点的温度 T 。当只使用 1 种导光胶制作包层光剥离器时,导光胶的长度为 9 cm,折射率为 1.56。实验结果如表 1 所示。

表 1 涂 1 种导光胶时的实验结果

Table 1 Experimental result with one gel

I / A	P_1 / W	P_2 / mW	Loss / dB	$T / ^\circ C$
1	3.4	29	20.7	27
2	7.8	75	20.2	32
3	13.1	130	20.0	40
4	17.2	165	20.1	46
5	22.7	216	20.2	54

当使用 3 种导光胶制作包层光剥离器时,每种导光胶的长度为 3 cm,折射率分别为 1.41、1.43 和 1.56。实验结果如表 2 所示。

表 2 涂 3 种导光胶时的实验结果

Table 2 Experimental result with three gels

I / A	P_1 / W	P_2 / mW	Loss / dB	$T / ^\circ C$
1	3.4	30	20.5	22
2	7.8	76	20.1	24
3	13.1	135	19.8	27
4	17.2	177	19.8	30
5	22.7	240	19.7	32

实验结果表明:使用 1 种导光胶和使用 3 种导光胶这两种方法,包层光的剥离度都约为 20 dB。但是,当只使用 1 种导光胶时,包层光剥离器的局部

温度过高,如果需要滤除的包层光较多时,包层光剥离器会因为局部温度过高而损坏;当使用 3 种导光胶时,包层光会分步滤除,不会造成包层光剥离器的局部温度过高,利于散热。

5 结 论

介绍了激光器输出光中包层光的来源,利用数值模拟和实验的方法对比研究了不同包层光滤除方法的性能。采用 3 种不同折射率的导光胶,分步滤除包层光,滤除效果可达到 20 dB,并可以防止局部的温度过高。实验中分析验证了一种滤除包层光的有效方案。

参 考 文 献

- 1 C. G. Carlson, P. D. Dragic, B. W. Graf *et al.*. High power Yb-doped fiber laser-based LIDAR for space weather[C]. *SPIE*, 2008, **6873**: 68730K
- 2 Alexandre Wetter, Mathieu Faucher, Benoit Sévigny. High power cladding light strippers[C]. *SPIE*, 2008, **6873**: 687327
- 3 A. Carter, E. Li. Recent progress in high-power fiber laser for high-power and high-quality material processing applications[C]. *SPIE*, 2006, **6344**: 63440F
- 4 G. Bonati, H. Voelckel, T. Gabler *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[C]. *Photonics West San Jose, Late Breaking Developments*, Session, 2005. 5709
- 5 E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi *et al.*. Double-clad, offset core Nd fiber laser[C]. *Proc. Optical Fiber Sensors*, 1988
- 6 Y. Jeong. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW of continuous-wave output power [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, Santa Fe New Mexico, 2004, **40**(8): 470~471
- 7 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 8 Yin Shupeng, Yan Ping, Gong Mali. End-pumped 300 W continuous-wave ytterbium-doped all-fiber laser with master oscillator multi-stage power amplifiers configuration [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 17864~17869
- 9 Wu Chongqing. *Optical Waveguide Theory* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 63~64
吴重庆. *光波导理论* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 63~64

栏目编辑: 宋梅梅