

被动双包层光纤中包层光产生实验研究

郭良 湛鸿伟 王泽锋 侯静 陈金宝

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 双包层光纤中的包层光不仅会影响到其输出激光的光束质量,还会对光学器件造成损坏。分析了被动双包层光纤中产生包层光的几种原因。通过在双包层光纤激光器的输出端引入产生包层光的不同要素,使用功率和光场分布检测等手段,实验研究了被动双包层光纤之间的熔接质量和模场失配以及无源光学器件的插入对于包层光产生的影响。实验结果表明,被动双包层光纤之间的低质量熔接和模场失配会导致纤芯基模与包层模式发生耦合,光纤合束器会激发高阶泄漏模式导致信号光泄漏到包层中,光纤隔离器会将部分信号光耦合到输出尾纤的包层中,从而导致包层光的产生。讨论了为抑制包层光的产生和减小包层光的影响应注意的事项和采取的措施。

关键词 光纤光学; 光纤激光; 被动双包层光纤; 包层光; 光场分布

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.020602

Experimental Study on the Generation of Cladding Light in Passive Double-Clad Fiber

Guo Liang Chen Hongwei Wang Zefeng Hou Jing Chen Jinbao

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

Abstract The cladding light in double clad-fiber laser will not only affect the laser beam quality, but also damage the optical devices. The reasons of the generation of cladding light in the passive double-clad fiber are analyzed, and the influence of these reasons on the cladding light generation is studied experimentally by the method of power and optical field distribution detection. The results indicate that, low-quality splices and mode field mismatch between the passive double-clad fibers would raise the coupling between fundamental mode and cladding modes, while the fiber combiner and isolator would lead to the leakage of light from the core to the cladding, which results in the generation of cladding light. Notes of restraining the generation and reducing the influence of cladding light are discussed.

Key words fiber optics; fiber laser; passive double-clad fiber; cladding light; optical field distribution

OCIS codes 060.2310; 060.3510; 140.3510

1 引言

光纤激光器具有光束质量好、转换效率高、热管理方便、结构紧凑、稳定性好等特点,因而在光纤通信、光纤传感、工业加工、生物医学和国防等领域有着广泛的应用。双包层光纤(DCF)和包层抽运技术的出现使得光纤激光器的功率水平产生巨大的飞跃,从而进一步提高了光纤激光器的应用价值^[1-4]。

随着光纤激光器朝着商业化应用发展,人们在追求高功率的同时,也越来越关注系统的输出光束质量和可靠性。然而,在实际的光纤激光器系统中会有多种原因导致包层光的产生,这不仅会影响到激光器输出的光束质量和单色性,还有可能损坏光学器件和输出设备。因此,研究如何抑制包层光的产生以及采取一定的措施来滤除包层光是十分必要的。对于全光纤结构的双包层光纤激光器,通常采用在光纤的内包层

收稿日期: 2013-09-25; 收到修改稿日期: 2013-11-02; 网络出版日期: 2014-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(11274385, 61077076)

作者简介: 郭良(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: guoliang88123@163.com

导师简介: 陈金宝(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事光纤激光及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: kdchenjinbao@yahoo.com.cn

外涂上高折射率匹配胶的方法来滤除包层光^[6],但此方法使包层光在较短的作用长度内被大量滤除并转化为热,容易造成局部温度过高。文献[6]在此方法的基础之上,使用3种不同折射率的匹配胶分步滤除包层光,增大了作用长度,在获得良好滤除效果的同时,使热量分布均匀,从而减小了局部温度过高。文献[7]提出一种新颖的包层光滤除方法,先依次使用氢氟酸和HF气体细化光纤内包层并使其表面产生细微小孔,再用低折射率紫外胶涂覆,通过破坏全反射条件来增大内包层的损耗,能够在较长的作用长度内均匀地滤除包层光。但是,这些研究工作主要集中在光纤激光器当中包层光的滤除方法上,且滤除对象主要为残余的抽运光。而实际上,光纤激光在被动双包层光纤中传输的过程中,由于各种原因,也会导致纤芯中的一部分信号光泄漏到内包层中去形成包层光,使输出激光的光束质量发生退化,甚至造成一些器件的损坏。

本文主要关注被动双包层光纤中包层光产生的来源,通过功率和光场分布检测等手段,实验研究了被动双包层光纤之间的熔接质量和模场失配以及光纤合束器和光纤隔离器的插入等因素对于包层光产生的影响。根据实验结果,指出了为抑制包层光的产生和减小包层光的影响应注意的事项和采取的措施,为搭建高光束质量、高稳定性的光纤激光器系统提供借鉴。

2 实验装置

激光在被动双包层光纤中传输的过程中,由于系统中各种元器件的存在以及光纤之间的熔接点和模场失配等原因,会使部分信号光泄漏到被动双包层光纤的内包层中形成包层光。我们搭建了一个10 W量级、经过包层光滤除处理的中心波长为1064 nm的掺镱光纤激光器作为标准光源,输出尾纤采用Nufern公司拉制的10/125双包层光纤(内包层直径125 μm ,纤芯直径10 μm ,数值孔径NA为0.06,在1064 nm处为单模),测得标准光源最大输出功率约为8.5 W,输出光斑如图1所示,为高斯光斑。在标准光源的输出端分别引入光纤熔接点、模场失配、光纤隔离器和光纤合束器等导致包层光产生的要素,通过分析前后输出功率和光场分布的变化来研究它们对于包层光产生的影响,实验装置如图2所示。实验中所用到的被动双包层光纤以及各种光学器件的尾纤均为10/125双包层光纤,从而避免了高阶模式对实验结果的影响。

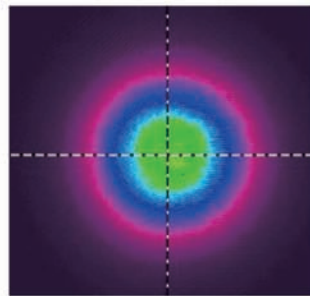


图1 标准光源的输出光斑

Fig.1 Beam spot of standard source

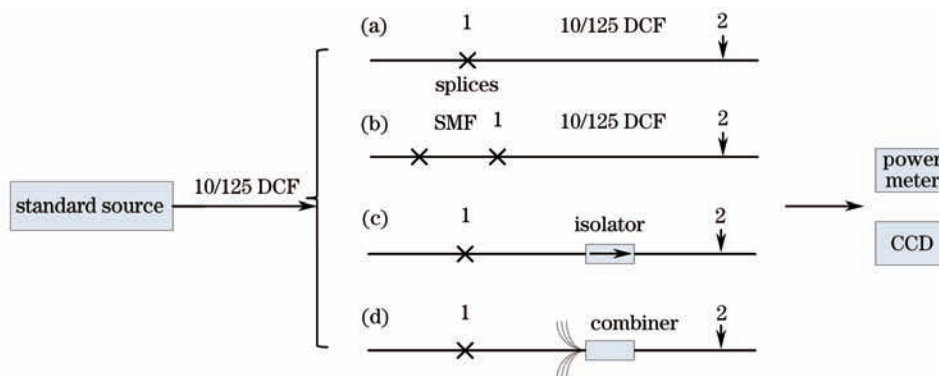


图2 实验装置图。在标准光源的输出端分别接入(a) 10/125双包层光纤;(b) 单模光纤和10/125双包层光纤;
(c) 光纤隔离器;(d) 光纤合束器

Fig.2 Experimental setup. The standard source is spliced with (a) 10/125 DCF; (b) SMF and 10/125 DCF; (c) isolator and (d) combiner, respectively

3 实验结果与分析

3.1 熔接质量对被动双包层光纤中包层光的影响

光纤熔接过程中产生的大量的热会改变纤芯掺杂元素的轴向分布,使接点处的纤芯折射率发生改变,从而导致纤芯基模与包层模式发生耦合,产生包层光^[6]。以不同的熔接质量在标准光源的输出端熔接一段与标准光纤输出尾纤相同的被动双包层光纤[图2(a)],分别在未做包层光滤除处理时和依次在熔接点处(位置1)、输出端之前(位置2)做包层光滤除处理时,测量输出功率和光斑,并与标准光源进行比较。

当熔接质量较差时[熔接前使光纤端面切割角度较大且不平整,图3(a)],测得未做包层光处理时的最大输出功率为8.39 W,光斑如图4(a)所示。与图1相比较,光场分布相对于标准光源变得不规整,光束质量有所下降。在位置1处做包层光滤除处理,输出功率降为8.36 W,光斑如图4(b)所示,即有0.03 W的包层光被滤除,而光场分布有了较为明显的改善。再在位置2处做包层光滤除处理,输出功率降为8.34 W,光场分布进一步得到改善,基本恢复至标准光源水平,如图4(c)所示,呈高斯光斑。实验中,8.39 W的输出光中约含有0.05 W的包层光,约占0.6%。这说明少量的包层光就会对输出的光场分布造成较大的影响。而当被动双包层光纤在大功率下工作时,假设传输功率为2000 W,将会产生12 W的包层光,这将对系统的光束质量和稳定性造成极大的影响。

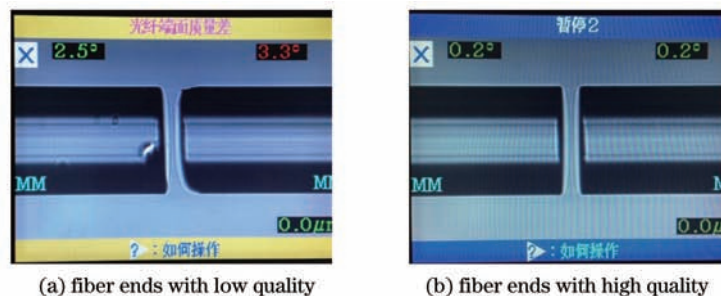


图3 熔接前光纤端面的切割质量

Fig.3 Quality of fiber ends before splicing

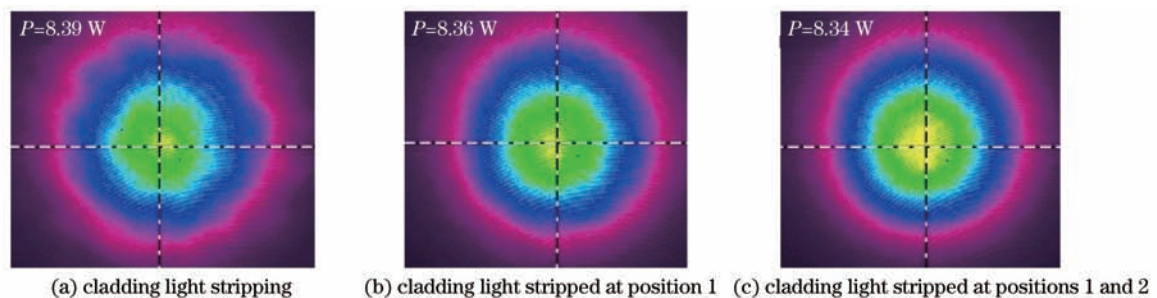


图4 熔接质量较差时的光斑

Fig.4 Beam spots when spliced with low quality

当熔接质量较好时[熔接前使端面切割平整且角度很小,图3(b)],在未做包层光滤除时测得最大输出功率为8.47 W,光斑如图5所示。光场分布基本没有受到影响,仍为高斯光斑。依次在位置1和2处做包层光滤除处理,输出功率和光斑几乎不变。说明当熔接质量较好时,基本不会导致纤芯光泄漏到包层中去。

3.2 模场失配对被动双包层光纤中包层光的影响

在标准光源的输出端熔接一段HI1060单模光纤(纤芯直径6 μm),测得此时最大输出功率为6.01 W,光斑如图6所示,仍为高斯光斑。通过在单模光纤之后熔接一段10/125双包层光纤[图2(b)]来研究模场失配对被动双包层光纤中包层光产生的影响。

在未做包层光滤除处理时和依次在位置1、2处做包层光滤除处理时,测得最大输出功率分别为4.96, 4.39和4.35 W,光斑如图7所示。可知模场失配造成了较大的熔接损耗,同时产生了大量的包层光,约0.61 W,为输出功率的12.3%,对光场分布造成了极大的影响,使光束质量严重下降。当依次在位置1、2处做包层光滤除处理时,输出光场分布得到明显改善。

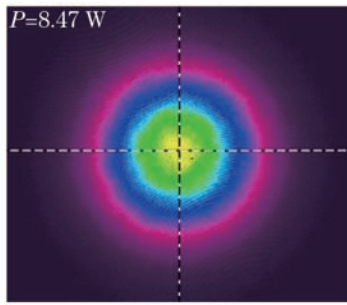


图5 熔接质量较好时的光斑

Fig.5 Beam spot when spliced with high quality

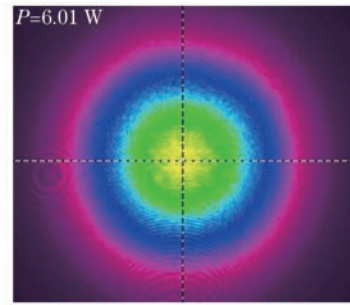
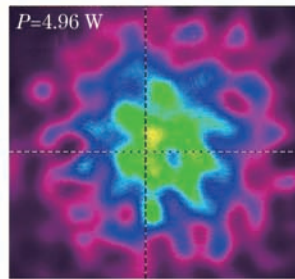
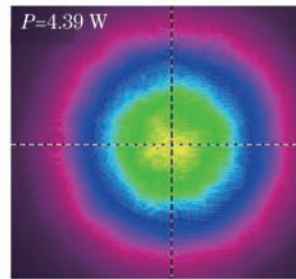


图6 熔接单模光纤时的光斑

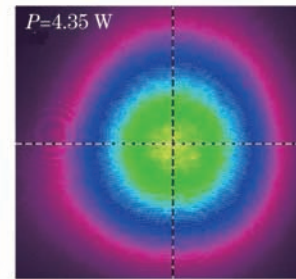
Fig.6 Beam spot when spliced with SMF



(a) without stripping



(b) stripped at position 1



(c) stripped at positions 1 and 2

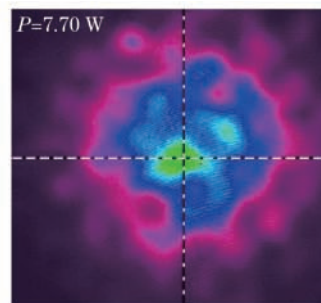
图7 模场失配时的光斑

Fig.7 Beam spots of mode field mismatch

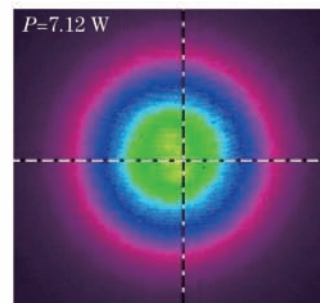
3.3 光纤隔离器对被动双包层光纤中包层光的影响

光纤隔离器是光纤激光器和光纤通信系统中常用的无源光学器件,它的作用是防止光路中由于各种原因产生的后向传输光对光源以及光路系统产生不良影响。

将国产某型号的光纤隔离器接在标准光源的输出端,如图2(c)所示。由于其输入臂光纤与标准光源输出尾纤相同,因此在保证良好熔接且在位置1处做包层光滤除的情况下,可以认为进入到光纤隔离器的光场不含包层光。在位置2处做包层光滤除前后,测得输出最大功率分别为7.70 W和7.12 W,光斑如图8所示。可以看出,纤芯光在经过光纤隔离器后,产生了约0.6 W的包层光,使光场分布发生了剧烈的变化。这是由于光纤隔离器内部为空间结构,信号光通过其内部的法拉第旋转器和双折射晶体后耦合进输出尾纤时,可能会造成一部分能量耦合到包层中,形成包层光,从而对输出的光场分布产生影响,使光束质量严重退化。在位置2处做包层光滤除后,输出光斑又恢复成高斯光斑。



(a) without stripping at position 2



(b) stripped at position 2

图8 熔接光隔离器后的输出光斑

Fig.8 Beam spots when spliced with isolator

3.4 光纤合束器对被动双包层光纤中包层光的影响

光纤合束器是在熔融拉锥光纤束(TFB)的基础上制作的光纤器件,如图9所示。在拉锥过程中,光纤的纤芯和包层等比例缩小,这会内部光场分布的变化。当信号光从熔融拉锥光纤束端面入射后,随着光纤直径减小到一定程度,纤芯对信号光的约束能力减弱,从而激发高阶的泄漏模式,导致一部分信号光从纤芯泄漏,形成包层光。

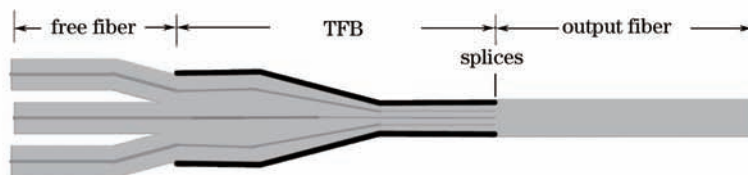


图9 光纤合束器结构示意图

Fig.9 Structure of fiber combiner

将某国产型号的光纤合束器的信号输入臂(光纤为10/125双包层光纤)接在标准光源的输出端,如图2(d)所示,保证良好熔接且在位置1处做包层光滤除处理。在位置2处做包层光滤除处理前后,测量得光纤合束器的最大输出功率分别为8.08 W和7.10 W,光斑如图10所示。可以看出,纤芯光在经过光纤合束器之后,产生了约1 W的包层光,约占输出光的12%,对光场分布产生了极大的影响。在位置2处做包层光滤除处理后,光场分布得到明显改善,但仍未达到标准光源水平,这可能是由于包层光未彻底滤除造成的。

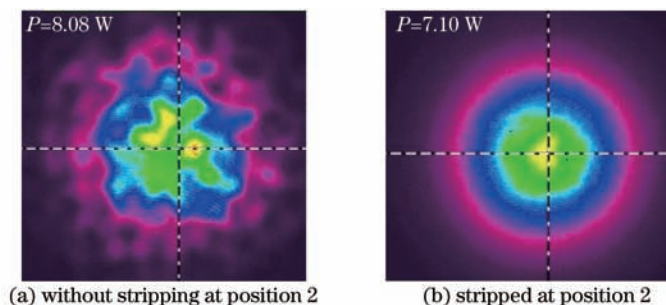


图10 熔接光纤合束器后的输出光斑

Fig.10 Beam spots when spliced with fiber combiner

综合上述实验结果,可以看出激光在被动双包层光纤中传输时,由于光纤之间的低质量熔接和模场失配,以及插入了光纤隔离器和光纤合束器等原因,会导致包层光的产生,从而改变输出光场分布,导致光束质量退化。为了避免和减少包层光的影响,一方面要采取合适的方法有效地滤除包层光;另一方面要从根源下手,通过合理的设计和精心的处理来减少包层光的产生。例如,在搭建光纤激光器系统时,应通过合理的设计,减少不必要的熔接点。在进行必要的熔接时,应保证光纤端面的平整,以提高熔接质量,减少包层光的产生。同时应尽量选用模场匹配的光纤,或在熔接前对模场失配的光纤进行模场适配处理。目前报道的高功率光纤激光器多采用主振荡功率放大(MOPA)结构,人们通常只是在每一个放大级的末端做一次包层光滤除处理。然而,由于每一级放大器都包含有多个光纤熔接点以及光纤合束器、光纤隔离器等可能产生包层光的来源,这些包层光的存在会影响到该放大级的效率、光束质量甚至可靠性。因此有必要在每一个可能导致包层光产生的来源处做包层光滤除。对于光纤隔离器,可以通过在其输出端做包层光滤除来减小包层光的影响,而光纤合束器输出尾纤的内包层要传输抽运光,不能做包层光滤除处理。这就要求我们通过使用数值模拟等手段,优化系统结构参数,提高转化效率,从而减少系统中放大级的个数,即减少使用光纤合束器和光纤隔离器等器件。

4 结 论

分析了光纤激光在被动双包层光纤传输过程中产生包层光的来源,实验研究了被动双包层光纤之间的熔接质量和模场失配以及光纤合束器和光纤隔离器等器件的插入对于包层光产生的影响。实验结果表明,被动双包层光纤之间的低质量熔接和模场失配都会导致纤芯基模与包层模式发生耦合,光纤合束器会激发高阶的泄漏模式使部分信号光泄漏到包层中去,光纤隔离器内部的空间结构会导致部分纤芯信号光耦合到输出尾纤的包层中,从而导致包层光的产生。还讨论了为抑制包层光的产生和减少包层光的影响应注意的事项和采取的措施,对设计和搭建高光束质量、稳定可靠的光纤激光器系统具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Duan Kaiyang, Zhao Baoyin, Zhao Wei, *et al.*. 1000 W all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3219.

- 段开棕, 赵保银, 赵卫, 等. 1000 W 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3219.
- 2 Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao, *et al.*. 1.75 kW home made Yb-doped double-cladding fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1277.
- 楼祺洪, 何兵, 薛宇豪, 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1277.
- 3 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW all-fiber Yb-doped laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416001.
- 闫平, 肖起榕, 付晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416001.
- 4 Ma Yanxing, Xiao Hu, Zhou Pu, *et al.*. kW level fiber laser in all-fiber format[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(5): 1137-1138.
- 马阎星, 肖虎, 周朴, 等. 全光纤激光器实现 kW 级功率输出[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(5): 1137-1138.
- 5 Carter A, Li E. Recent progress in high-power fiber lasers for high-power and high-quality material processing applications[C]. SPIE, 2006, 6344: 63440F.
- 6 Wang Wenliang, Leng Jinyong, Cao Jianqiu, *et al.*. Method for stripping cladding light in the high power fiber laser[J]. Opt Commun, 2013, 287: 187-191.
- 7 Poozesh R, Norouzy A, Golshan A H, *et al.*. A novel method for stripping cladding lights in high power fiber lasers and amplifiers[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(20): 3199-3202.
- 8 El-Diasty F. Laser-scattering-based method for investigation of ultra-low-loss arc fusion-spliced single-mode optical fibers[J]. J Lightwave Technol, 2004, 22(6): 1539-1542.