

文章编号 1004-924X(2018)07-1561-09

高功率全光纤侧面抽运耦合器研究进展

雷成敏, 谷炎然, 陈子伦*, 侯 静

(国防科技大学 前沿交叉学科学院 高能激光技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要: 本文回顾了高功率全光纤侧面抽运耦合器的研究进展, 重点介绍了拉锥-熔合法制作的侧面抽运耦合器的基本原理、研究现状、面临挑战及解决方案。该方案可实现千瓦量级高抽运耦合效率高信号光通过率抽运/信号耦合器的制备, 是高功率全光纤侧面抽运耦合器的主流方案。结合已报道的理论和实验结果, 总结了该方案在制作工艺、损耗机理、性能提升等方面面临的挑战, 提出了将侧面抽运耦合器引入级联抽运光纤激光器的方案, 并将一种 $(2+1) \times 1$ 侧面抽运耦合器成功应用于 2.5 kW 输出的级联抽运掺镱光纤激光器中。结果表明, 相比 LD 抽运, 在级联抽运中, 高亮度光纤激光作为抽运光源使耦合器在保证高抽运耦合效率的同时具有更高的功率承载能力。

关键词: 光纤激光器; 侧面抽运; 光纤耦合器; 拉锥-熔合法

中图分类号: TN248; TN622 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182607.1561

Developments of high power all-fiber side-pumping combiner

LEI Cheng-min, GU Yan-ran, CHEN Zi-lun*, HOU Jing

(*Institute of High Power Laser Technology, College of Advanced Interdisciplinary Studies,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zilun2003@163.com*

Abstract: In this paper, we present a general review of the development of a high-power all-fiber side-pumping combiner developed over the past few years. Our main focus is on the fundamental mechanism of operation, in addition to a review of the development and the challenges associated with the realization of a functional side-pumping combiner, which was fabricated using a tapered-fused technique. This technique can potentially be exploited as a side-pumping method because of its high coupling efficiency, high signal transfer efficiency, and its capability of handling high pump powers up to the kilowatt range. This review includes an overview of theoretical and experimental results, the challenges associated with fabrication, an investigation of the loss mechanism, and an overview of the performance improvement of the combiner. In summary, a new $(2+1) \times 1$ side-pumping combiner for a 2.5 kW fiber laser based on tandem pumping is introduced. The presented results suggest that the side pumping combiner has a high power loading capability as well as a high coupling efficiency when applied in a tandem-pumping scheme, due to the high brightness of the fiber laser as the pump light source.

Key words: fiber laser; side-pumping; fiber coupler; tapered-fused technique

收稿日期: 2017-12-25; 修订日期: 2018-02-10.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2017YFF0104600); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61370045)

1 引言

随着双包层光纤、大模场面积光纤、半导体激光器(LD)作为抽运源、级联抽运等技术的涌现与发展,光纤激光器的输出功率不断提升^[1-2]。美国 IPG 公司在 2005 到 2013 年依次实现了单模光纤激光器 2 kW、3 kW、6 kW 乃至 10 kW^[3]、20 kW^[4] 的跨越。在输出功率不断提升的同时,光纤激光器的结构也由最初的空间结构过渡到全光纤结构,以光纤光栅、光纤耦合器等光纤元器件取代空间结构中的分立式光学元件,通过光纤熔接工艺将抽运源、谐振腔以及增益光纤连接为一体,使系统结构更加紧凑、稳定,转换效率更高,可靠性更好。

光纤抽运/信号耦合器,承担着将一束或者多束抽运光高效地耦合到双包层光纤内包层的重要任务,其承载功率的大小也直接决定着光纤激光器的输出功率水平。采用侧面抽运技术制作光纤信号/抽运耦合器,是指将抽运光从双包层信号光纤的侧面耦合进双包层光纤的内包层,不占用光纤的两端,不影响信号光的输入输出和传输。该技术最主要的优点就是信号光纤不被截断或拉锥,能最大程度地减少信号光的损耗,提高耦合效率,并且保证良好的光束质量,从而实现多级级联抽运。这些优势都是主流端面抽运技术——熔融拉锥光纤组束技术(Taper-Fused Fiber Bundles, TFB)^[5-6]无法实现的。因此,研制一种耦合效率高、稳定性好的侧面抽运耦合器,对于搭建高功率、高光束质量的光纤激光系统具有重要意义。常用的侧面抽运方式有 V 型槽法耦合技术^[7-8]、嵌入反射镜法耦合技术^[9]、微棱镜法^[10]、衍射光栅法^[11-14]等。这些侧面抽运结构的耦合效率均低于 90%,且大部分并非全光纤结构,难以保证有效和稳定的抽运/信号合束,无法满足工业应用的需求。在已报道的全光纤结构侧面抽运耦合器中,利用光纤拉锥-熔合法制作的耦合器,即经过拉锥处理的抽运光纤直接与信号光纤内包层表面熔合,不仅可以获得较高的抽运耦合效率(>98%),而且可以承载千瓦量级的抽运功率和信号光功率。因此,该方法已经成为制作高功率侧面抽运耦合器的主流方法。本文从该方法制作的侧面抽运耦合器的原理出发,对国内外高功率全光纤侧面抽运耦合器的研究现状进行了总结与分析,提出了制约其承载功率进一步提升的关键

因素及其解决方案,为此技术的进一步研究与应用提供了参考。

2 耦合原理及损耗机制

如图 1 所示,以常规的 $(2+1)\times 1$ 结构侧面抽运耦合器为例,它由一根信号光纤和两根拉锥抽运光纤构成,抽运光纤的拉锥区域只保留锥腰区及一端过渡区。从结构上看,侧面抽运耦合器的抽运光纤与信号光纤的纤芯相距较远,在抽运光耦合进信号光纤的同时,信号光又可以有效地束缚在双包层光纤的纤芯内,从而在提高抽运耦合效率的同时,保证高信号光通过率。抽运光在经过拉锥抽运光纤后,传输角度逐渐增大,直到不满足全反射条件、超过抽运光纤临界角转化为包层模。由于抽运光纤贴合在双包层光纤的内包层上,且内包层的折射率高于抽运光纤的包层,包层模会耦合进信号光纤,被其内包层束缚,完成整个耦合过程。由此可见,在拉锥之前,抽运光纤的包层是有必要保留的,若采用无芯光纤,光线在拉锥无芯光纤中传播,当传输角度逐渐变大不满足全反射角时,会直接泄漏到空气中造成抽运耦合效率的下降^[15]。

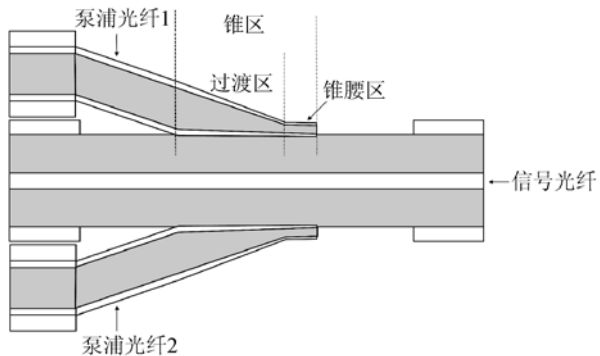


图 1 $(2+1)\times 1$ 抽运耦合器侧面结构示意图

Fig. 1 Longitudinal scheme of $(2+1)\times 1$ combiner

然而,并不是所有抽运光都能有效耦合进信号光纤,未耦合进信号光纤内包层的抽运光能量主要分为 3 类^[16](如图 2 所示):(1) 从拉锥光纤过渡区泄漏的抽运光功率(Leakage Power along the Transition section, LPT)。抽运光首先要经过拉锥光纤的锥形过渡区,有一部分入射角度较大的抽运光在锥形区域传输角度会很快增大,即使超过抽运光纤临界角进入信号光纤,也不能被

信号光纤的内包层束缚,从而泄漏到空气中。这部分能量可由热沉装置散去。(2)抽运光纤剩余抽运光功率(Leakage Power at the End of pump fiber, LPE)。若抽运光入射角度较小或抽运光纤的拉锥比较小时,这部分抽运光在抽运光纤传输过程中,由于传输角度未达到抽运光纤的临界角,抽运光一直在抽运光纤中,并最终从抽运光纤末端转移到空气中。这部分能量也可由热沉装置散去。(3)从信号光纤涂覆层泄漏的热损耗(Leakage Power into the Coating of signal fiber, LPC)。这部分抽运光耦合进入双包层信号光纤,由于传输角度超过双包层信号光纤内包层的临界角,抽运光从信号光纤内包层泄漏到涂覆层中,转化为热能堆积在光器件上。这部分能量过大会造成器件的不可逆损坏,是制约器件承受功率最重要的参数之一。

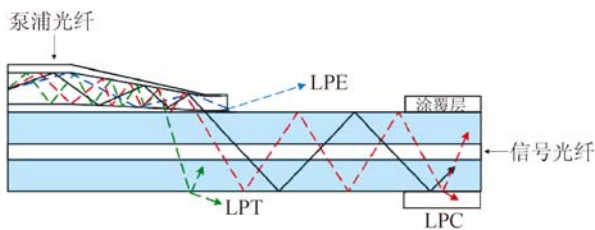


图 2 耦合到信号光纤内包层的抽运光能量分布
Fig. 2 Distribution of power loss in coupling process

3 研究进展

3.1 拉锥-熔合法的提出

1999 年, G. V. Valentine 等人提出利用拉锥-熔合法实现侧面抽运耦合的方案^[17]。如图 3 所示,将一段经过拉锥处理的多模光纤缠绕在信号光纤表面,通过加热拉锥区域将多模光纤与信号

光纤熔合,从而实现抽运光经由多模光纤耦合进信号光纤包层中。2012 年,德国 T. Theeg 等人对此方案进行了全面系统的理论计算与实验验证^[18],实现了含有 6 根和 4 根抽运光纤的抽运臂,完成了双向抽运的全光纤侧面抽运耦合器的研制及基于该耦合器的激光器系统的搭建和测试,其中含有 6 根抽运光纤的耦合器总的抽运耦合效率为 89.6%,含有 4 根抽运光纤的耦合器总的抽运耦合效率达到 90.2%,4 根抽运臂能承受的最大抽运功率达到 440 W,激光器系统输出信号的光束质量接近衍射极限。耦合器设计图如图 4 所示。耦合器的制作过程分为以下几步:(1)将无芯 IF(Intermediate fiber)剥除涂覆层后放到拉锥机上拉锥成预先设定的形状;(2)TF(Target Fiber)中间剥除涂覆层后,将 IF 与 TF 缠绕紧贴;(3)将 TF 与 IF 的紧贴部分在拉锥机上加热熔融在一起;(4)将 IF 与 PFF(Pump Feeding Fiber)熔接。利用这种耦合器搭建激光器时采用的是后向抽运方式^[19],使系统的 SBS 阈值提高了 60%。实验结果说明,这种侧面抽运耦合器在光纤激光器的功率和光束质量的同步提升方面具有巨大潜力,拉锥-熔合法也逐渐成为制作全光纤侧面抽运耦合器的主流方法。

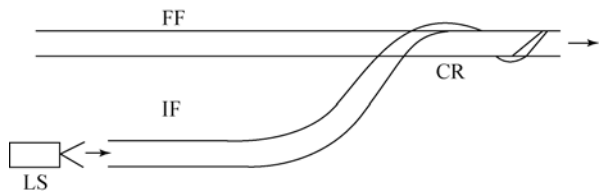


图 3 G. V. Valentine 等人提出的侧面抽运耦合的方案^[17]
Fig. 3 Tapered-fused side-pumping technique (by G. V. Valentine *et al.*)^[17]

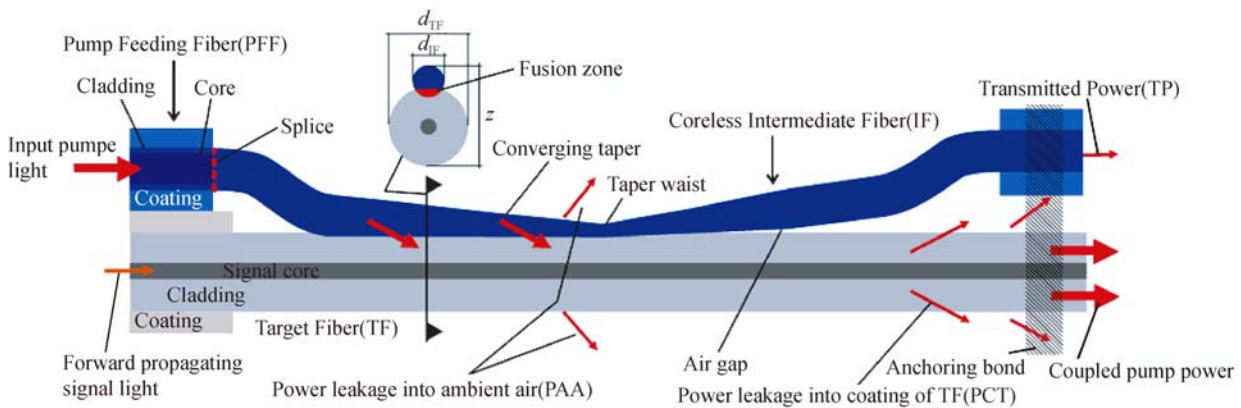


图 4 T. Theeg 等人提出的侧面抽运耦合方案^[18]
Fig. 4 Side-pumping coupler presented by T. Theeg *et al.*^[18]

3.2 千瓦量级功率承载能力的实现

清华大学在 2004 年开始利用光纤角度抛磨法来研究侧面抽运耦合器^[20-22]。抽运光纤角度抛磨法是指将抽运光纤进行角度抛磨,再贴合到信号光纤表面的方法。但受限于机械加工精度、贴合精度以及有限的耦合长度等限制,利用该方法制作的侧面抽运耦合器并不能满足千瓦量级高效耦合的要求。2013 年他们也提出了抽运光经过拉锥多模光纤进入待耦合光纤的方案^[15]。不同于文献^[18],该方案并未采用无芯光纤作为抽运光纤,而是直接采用带有包层的多模光纤作为抽运光纤。抽运光纤的包层处于抽运光纤的纤芯和待耦合光纤之间,形成折射率沟槽(Refractive

Index Valley, RIV),如图 5 所示。经理论计算与实验验证,RIV 能够对反向传输的激光起到阻挡作用,大大提高了侧面抽运耦合器的反向隔离度,使它在反向抽运结构中能够起到保护抽运源的作用。采用该方案研制的 $(2+1)\times 1$ 侧面抽运信号耦合器^[23],可承载千瓦量级的抽运功率,耦合效率达到 98.6%,并成功应用到双向抽运的全光纤单频光纤激光器系统中,且光束质量得到良好的保持。2014 年和 2016 年,该方案被分别应用到全光纤 3 kW 激光输出光纤激光器^[24]和 3.89 kW 双向抽运拉曼光纤激光器^[25]中,验证了该方案能够满足光纤激光器高功率、高耦合效率双向抽运耦合的需求^[26]。

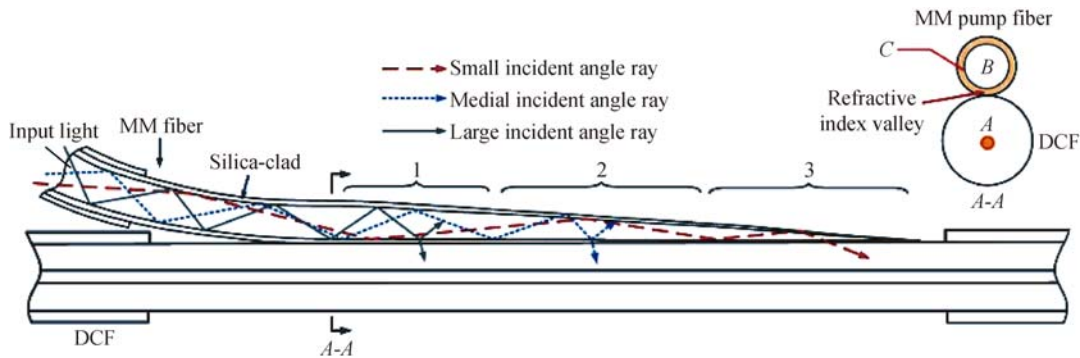


图 5 含折射率沟槽的侧面抽运耦合器示意图^[15]

Fig. 5 Schematic diagram of side-pumping couplers with RIV^[15]

3.3 多点点级联结构

端面抽运的抽运位置最多只有两个,而侧面抽运合束则可以采用多点点级联结构来进一步提高激光的输出功率。北京工业大学谭祺瑞等人采用拉锥-熔合法制作了一种适用于高功率光纤激光器的级联结构侧面抽运耦合器^[27],其单臂耦合效率为 98.5%,级联 5 个抽运点的总耦合效率为 97.5%。利用该耦合器,采用双向抽运方式(如图 6 所示)搭建了输出功率为 780 W 的连续光振荡器,验证了侧面抽运耦合器应用于多点点级联结构的可行性。清华大学也设计了一种级联两级的

$(2+1)\times 1$ 侧面抽运耦合器,可承载千瓦量级的抽运光功率,耦合效率为 92.5%^[28]。然而,在级联结构中,从前一级耦合进信号光纤的抽运光在传输至下一级耦合区时传输角度会受级联结构的影响而增大,当传输角度超过信号光纤内包层的临界角时,抽运光将会泄漏到涂覆层中,转化为 LPC 堆积在光器件上^[18,29],导致总耦合效率下降的同时,也影响后几级器件的稳定性,增加热管理的难度。因此,级联结构侧面抽运合束的参数设计有待进一步完善。

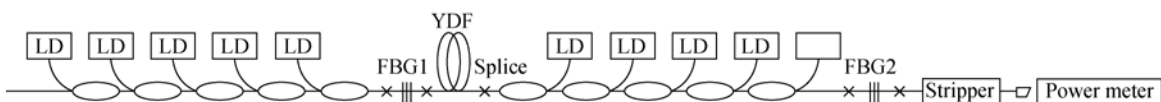


图 6 利用级联侧面抽运耦合器搭建的谐振腔^[27]

Fig. 6 Fiber oscillator using cascaded side-pumping combiners^[27]

3.4 理论模型的完善

在理论仿真方面,关于该方案的模型都是假设抽运光纤直接贴合在信号光纤表面,主要侧重于研究抽运光纤结构参数对耦合器的影响。然而在实际情况下,抽运光纤和信号光纤需要通过一定时间的高温加热进一步熔合,抽运光纤和信号光纤会互相嵌入,且嵌入的程度与加热火源的位置、温度、加热时间等外界环境参数密切相关。为了研究这种嵌入程度对耦合器的影响,更全面地利用理论仿真结果指导器件制作,我们提出在仿真模型中引入熔合深度和熔合比例 δ ^[29],如图 7 所示,利用有限差分光束传输法来计算抽运光的传输过程。结果表明,增加熔合深度或熔合比例可以有效提升抽运耦合效率,但在耦合效率提升的同时也会伴随着反向抽运隔离度的降低。由于熔合深度和 δ 受熔合时间、火头的位置和尺寸、火焰温度等因素的影响较大,在仿真中引入这两个参数,不仅为合理选择光纤结构参数提供更全面的理论指导,也为合理选择加热源参数提供了可能。

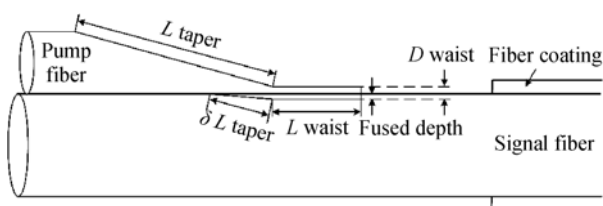


图 7 考虑熔合深度的侧面抽运耦合器模型^[29]

Fig. 7 Scheme of side-pumping combiner with fused depth considered^[29]

由于信号光纤涂覆层的热损耗 LPC 是制约器件承受功率的最重要参数之一,需要从理论上研究耦合器各项参数对 LPC 的影响,为制作能够长时间连续稳定工作的耦合器提供理论指导。Thomas 等人利用光束追迹法在理论上研究了不同拉锥比以及入射抽运光 NA 对这种热损耗的影响^[18],结果表明这种损耗可以通过降低拉锥比来抑制,并且受入射抽运光 NA 的影响很大。由于仿真采用的是几何光学方法,仿真结果并不全面。我们通过有限差分光束传输法可获得 LPC 沿涂覆层纵向长度的变化情况^[29],更全面地分析熔合深度、抽运光纤锥腰直径、入射模场等因素对 LPC 的影响。经过合理的理论分析与参数设计,我们采用拉锥-熔合法制备了一种 $(2+1)\times 1$ 结

构的侧面抽运耦合器,其纵向和截面显微镜视图如图 8 所示。耦合器双臂的总耦合效率超过 97%,且应用到双向抽运^[30]后向抽运^[29]千瓦级光纤激光器中。

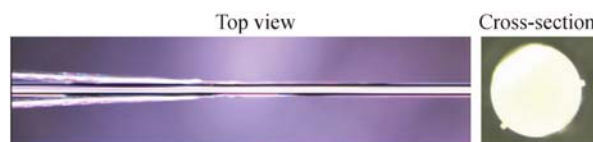


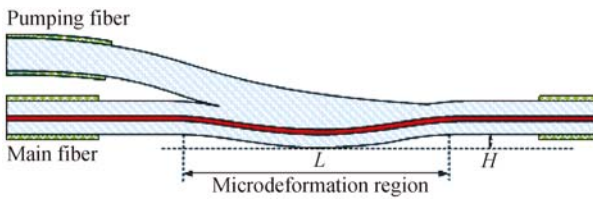
图 8 侧面抽运耦合器显微镜视图^[29]

Fig. 8 Microscope images of side-pumping combiner^[29]

4 面临的挑战及解决方案

4.1 信号光损耗的不确定性

信号光插入损耗是指信号光纤输出的信号光功率相对于输入信号光功率的减少值,也是描述信号/抽运耦合器的重要指标之一。理论上,拉锥抽运光纤和信号光纤包层的熔并不会影响信号光纤的纤芯,不影响信号光的通过率。但是在实际器件的制备过程中,一方面,信号光纤受应力不均、火源温度高等因素的影响会发生微小形变;另一方面,位于耦合区域的信号光纤纤芯中的少量掺杂离子在高温的影响下有可能向包层扩散,使纤芯的折射率分布发生改变,从而改变信号光的模场传输^[31-32]。对于纤芯包层比较小的光纤,这些不确定因素带来的信号光损耗是可以容忍的^[18]。清华大学甚至利用加热熔合带来的微小形变设计并制作了一种可以进行模式选择的高效率侧面抽运耦合器^[33],其结构如图 9 所示。主光纤传输的信号光通过微弯曲光纤后,基模保持高效传输,而高阶模式发生泄漏,并有部分高阶模式将转换为基模光。然而,对于纤芯包层比较大或者纤芯较大可支持多个模式、以及纤芯掺杂离子浓度较高的信号光纤,上述的两种不确定性因素有可能引入较大的信号光插入损耗,使部分高功率信号光在通过耦合器时泄露到信号光纤包层中,导致激光器输出功率的降低。在反向抽运结构中信号光功率很高,泄露的信号光还有可能进入抽运光纤进而损坏抽运光源。因此,这些不确定性因素给耦合器制备过程的火源控制、机械平台精度等细节提出了新的挑战,而引起插入损耗的机理也有待进一步研究。

图 9 可选模的侧面抽运耦合器结构图^[33]Fig. 9 Structure of side-pumping coupler with mode selection^[33]

4.2 抽运臂数量增加与高耦合效率无法同时满足

由于单个抽运光源的功率有限,进一步提高光纤激光器的输出功率需要增加耦合器的抽运臂。然而,无论是增加单个侧面抽运耦合器的抽运臂,还是采用级联结构来增加抽运臂,总的抽运耦合效率都在理论上和实验上被证明会出现下降的趋势。一方面,无论是同一个耦合区域有多根抽运臂,还是含有多个耦合区域的级联结构中,已经耦合进信号光纤内包层的抽运光在耦合区域传输的过程中,其传输角度都有可能因为耦合区的不规则形状而增大,超过信号光纤内包层的临界角转化成 LPT 或 LPC。第二节提到,新增的 LPT 损耗可由热沉装置散去,而 LPC 的进一步增加对器件的损伤可能是致命的。另一方面,增加抽运臂或者采用级联结构,信号光纤和抽运光纤的加热熔合区域面积变大或数量变多,也必将引入更多的信号光损耗,给器件的稳定工作带来更多不确定性。因此,如何在保证高耦合效率的同时,进一步提升耦合器的可注入抽运功率,是高功率全光纤侧面抽运耦合器面临的又一个挑战。

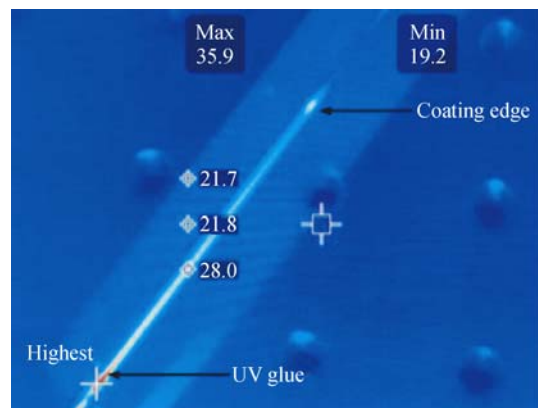
4.3 入射抽运光 NA 对器件性能的影响

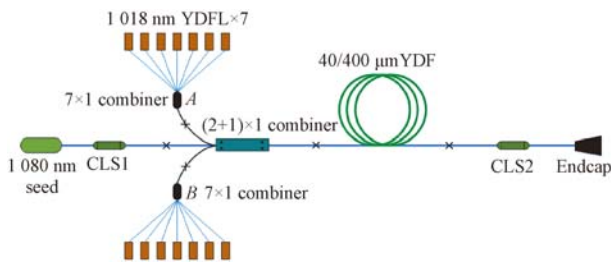
文献 [18] 的理论仿真结果提到,抽运光的入射数值孔径(NA)对耦合器性能的影响较大。为了获得较高的耦合效率以及较低的热损耗,抽运光的数值孔径、抽运光纤拉锥比、拉锥长度等参数都存在一个最优值。文献 [15] 测量了不同 NA 抽运光入射的情况下耦合器的反向耦合效率,结果表明 NA 较小时反向耦合效率非常小;随着 NA 逐渐增大,反向耦合效率逐渐增大;当 NA 超过 0.3 时,反向耦合效率又呈下降趋势。我们也在文献 [29] 中指出,耦合器的 LPC 受入射抽运光 NA 的影响非常大,NA 越大,LPC 也越大,影

响器件的抽运功率承载能力。由此可见,在亮度较低的半导体激光器(LD)作为抽运源的情况下,不同抽运源的输出特性可能大相径庭,因此耦合器无法在任意 LD 作为抽运源的情况下都有一个良好的性能。

4.4 解决方案

由于单个 LD 亮度有限,在 LD 直接抽运的情形下,侧面抽运耦合器承载功率能力的提升必将面临上述几种挑战,从而限制光纤激光器输出功率的进一步提升。相比于 LD 抽运,级联抽运方案不仅可以使抽运光亮度明显提高,还能有效缓解光纤内的热负荷,所以近年来在高功率光纤激光器领域受到了密切关注^[34-35]。结合级联抽运方案和侧面抽运耦合器的优势,我们提出了一种适用于级联抽运结构掺镱光纤激光器的 $(2+1) \times 1$ 侧面抽运耦合器^[36]。实验中,将七束 1 018 nm 激光合束后(总功率 1 290 W)注入侧面抽运耦合器的抽运臂进行抽运耦合效率测试,双臂耦合效率都能达到 98%。图 10 给出了当抽运功率为 811 W 时耦合器输出段涂覆层的温度分布情况。相比文献[29]的仿真和实验结果,1 018 nm 激光抽运情况下,LPC 热损耗在相同抽运功率水平下相比 LD 抽运有明显改善,且分布更加均匀,而非文献[29]中提到的在涂覆层边界很小的范围(小于 2 mm)内迅速积累。涂覆层热损耗是决定耦合器功率承载能力的关键因素,因此在级联抽运结构下,侧面抽运耦合器的功率承载能力和稳定性都有更大的提升空间。

图 10 耦合器涂覆层的工作温度情况(811 W 抽运光)^[36]Fig. 10 Coating temperature of combiner (811 W)^[36]

图 11 全光纤结构级联抽运光纤激光器结构图^[36]Fig. 11 Experimental setup of all-fiber amplifier based on tandem pumping^[36]

基于这种耦合器,我们搭建了全光纤结构光纤激光器系统,如图 11 所示。1 080 nm 种子激光功率为 152 W,1 018 nm 激光总功率为 2 882 W,作为抽运光注入耦合器。当抽运光功率达到最大时,激光器的输出功率为 2 553 W,放大器的斜率效率为 82.5%。由此可见,由于级联抽运结构采用光纤激光作为抽运光源,其发散角较小,单臂输出功率较高,极大提升了单个侧面抽运耦合器的功率承载能力。

需要指出的是,虽然此方案验证了利用级联抽运来提升单个侧面抽运耦合器功率承载能力的可行性,但是利用该方案搭建的光纤激光器系统也不可避免会面临非线性效应、抽运光吸收效率等问题。如何最大程度利用侧面抽运优势,设计合理的抽运结构,降低系统的非线性阈值,提高抽

运吸收效率,仍需要进一步研究。尤其是在反向抽运结构中,由于光纤激光器对反向回光的损伤阈值远低于 LD,级联抽运方案给侧面抽运耦合器的反向隔离度以及 4.1 节中提到的信号光插入损耗等性能提出了更高的要求。

5 结 论

本文基于全光纤侧面抽运耦合器的基本原理,总结了国内外近五年来高功率全光纤侧面抽运耦合器的研究进展。该方法可实现千瓦量级高抽运耦合效率、高信号光通过率的抽运/信号合束,已成为高功率全光纤侧面抽运耦合器的主流方案。为了进一步提高耦合器的各项性能,面临的挑战主要有信号光插入损耗的不确定性、抽运臂数量增加与高耦合效率无法同时满足、入射抽运光数值孔径对器件性能影响较大等。基于这些问题,我们提出了一种适用于级联抽运的 $(2+1) \times 1$ 侧面抽运耦合器,并成功应用于级联抽运掺镱光纤激光器中,当 1 018 nm 抽运光功率为 2 882 W 时,获得了 2 553 W 的 1 080 nm 激光输出,验证了利用级联抽运方案来提升单个侧面抽运耦合器功率承载能力的可行性。

参考文献:

- [1] JAUREGUI C, LIMPET J, TÜNNERMANN A. High-power fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [2] ZERVAS M N, CODEMARD C A. High power fiber lasers: a review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 1-23.
- [3] GAPONTSEV V, FOMIN V, FERIN A, et al.. Diffraction limited ultra-high-power fiber lasers [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2010.
- [4] SHINER B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market [C]. *CLEO: Applications and Technology*, 2013.
- [5] DIGIOVANNI D J, STENTZ A J. Tapered fiber bundles for coupling light into and out of cladding-pumped fiber devices: US, US5864644 [P]. 1999.
- [6] RASMUSSEN M H. Fiber bundles and methods of making fiber bundles: US, US7236671 [P]. 2007.
- [7] GOLDBERG L, COLE B, SNITZER E. V-groove side-pumped 1.5 μm fibre amplifier [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(25): 2127-2129.
- [8] KOPLOW J P, GOLDBERG L, KLINER D A V. Compact 1-W Yb-doped double-cladding fiber amplifier using V-groove side-pumping [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 1998, 10(6): 793-795.
- [9] KOPLOW J P, MOORE S W, KLINER D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(4): 529-540.
- [10] WEBER T, LÜTHY W, WEBER H P. Side-pumped fiber laser [J]. *Applied Physics B*, 1996, 63(2): 131-134.
- [11] HUANG C W, CHANG C L, JHENG D Y, et al.. Symmetrically side-pumped 10 W ytterbium-doped fiber laser by sub-wavelength grating cou-

- pler [C]. *Lasers and Electro-Optics Europe*, 2011; 1.
- [12] HERDA R, LIEM A, SCHNABEL B, *et al.*. Efficient side-pumping of fibre lasers using binary gold diffraction gratings [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(3): 276-277.
- [13] LIN S L, LEE Y W, HSU K Y, *et al.*. Design of resonantly side-pumped 1 645 nm Er : YAG crystal fiber lasers with grating couplers [C]. *Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, 2013: 1-2.
- [14] HUANG C W, HUANG D W, CHANG C L, *et al.*. Demonstration of side coupling between high power laser diode array and double-clad fiber using sub-wavelength grating [C]. *CLEO: 2011-Laser Science to Photonic Applications*, 2011: 1-2.
- [15] QIRONG X, PING Y, HAICHUI R, *et al.*. A side-pump coupler with refractive index valley configuration for fiber lasers and amplifiers [J]. *Lightwave Technology*, 2013, 31(16): 2715-2722.
- [16] 易博凯. 基于缠绕式熔融加热的侧面抽运光纤耦合器的研制 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- YI B K. A Fused Side-Pumping Optical Fiber Coupler Based on Twisting [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [17] VALENTIN G P, IGOR S. Coupling arrangement between a multi-mode light source and an optical fiber through an intermediate optical fiber length: US, US5999673 [P]. 1999.
- [18] THEEG T, SAYINC H, NEUMANN J, *et al.*. Pump and signal combiner for bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28125-28141.
- [19] THEEG T, SAYINC H, NEUMANN J, *et al.*. All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300 W output power [J]. *Photonics Technology Letters*, IEEE, 2012, 24(20): 1864-1867.
- [20] QIRONG X, YAN P, YAPING W. Fused angle-polished multi-points side-pumping coupler for monolithic fiber lasers and amplifiers [J]. *Optics Communications*, 2012(285): 2137-2143.
- [21] QIRONG X, PING Y. 100 W ytterbium-doped monolithic fiber laser with fused angle-polished side-pumping configuration [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(2): 125.
- [22] PAN O, PING Y, MALI G. Studies of pump light leakage out of couplers for multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber lasers [J]. *Optics Communications*, 2004(239): 421-428.
- [23] XIAO C, QI RONG X, GUANG YONG J. High coupling efficiency and low signal light loss $(2+1) \times 1$ coupler [J]. *Chin. Phys. B*, 2015, 24(6): 64208.
- [24] 王雪娇, 肖起榕, 闫平, 等. 国产光纤实现直接抽运全光纤化 3000W 级激光输出 [J]. *物理学报*, 2015, 64(16): 257-262.
- WANG X J, XIAO Q R, YAN P, *et al.*. 3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(16): 257-262. (in Chinese)
- [25] XIAO Q, YAN P, LI D, *et al.*. Bidirectional pumped high power Raman fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6758-6768.
- [26] 肖起榕, 张大勇, 王泽晖, 等. 高功率光纤激光抽运耦合技术综述 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 201008.
- XIAO Q R, ZHANG D Y, WANG Z H, *et al.*. Review of high power fiber laser pump coupling technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 201008. (in Chinese)
- [27] QIRUI T, TINGWU G. Cascaded combiners for a high power CW fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(2): 25102.
- [28] CHEN X, XIAO Q, JIN G, *et al.*. Pump couplers in a cascaded structure [J]. *International Journal of Nanotechnology*, 2015, 12(10): 926-934.
- [29] LEI C, CHEN Z, LENG J, *et al.*. The influence of fused depth on the side-pumping combiner for all-fiber lasers and amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017(1): 99.
- [30] 雷成敏, 陈子伦, 冷进勇, 等. 高功率全光纤 $(2+1) \times 1$ 侧面抽运合束器的研制 [J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 8-12.
- LEI CH M, CHEN Z L, LENG J Y, *et al.*. The research of high power all-fiber $(2+1) \times 1$ side-pumped combiner [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 8-12. (in Chinese)
- [31] HANAFUSA H, HORIGUCHI M, NODA J. Thermally-diffused expanded core fibres for low-loss and inexpensive photonic components [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(21): 1968-1969.
- [32] SHIRAIISHI K, YANAGI T, KAWAKAMI S.

- Light-propagation characteristics in thermally diffused expanded core fibers [J]. *Lightwave Technology Journal*, 1993, 11(10): 1584-1591.
- [33] XIAO Q, CHEN X, REN H, *et al.*. Fiber coupler for mode selection and high-efficiency pump coupling [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1170-1172.
- [34] ZHOU P, XIAO H, LENG J, *et al.*. High-power fiber lasers based on tandem pumping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A29-A36.
- [35] 肖虎,冷进勇,周朴,等. 高功率级联抽运掺镱光纤激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 94-105.
- XIAO H, LENG J Y, ZHOU P, *et al.*. High power tandem-pumped Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 94-105. (in Chinese)
- [36] GU Y, LEI C, LIU J, *et al.*. Side-pumping combiner for high-power fiber laser based on tandem pumping [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(11): 116109.

作者简介:



雷成敏(1992—),女,贵州贵阳人,博士研究生,2014年、2017年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤激光及大功率光纤激光器件的研究。E-mail: leichengmin23@126.com

导师简介:



侯静(1975—),女,四川都江堰人,博士,研究员,博士生导师,1997年、2002年于国防科技大学分别获得学士、博士学位,主要从事光纤激光及光子晶体光纤的研究。E-mail: houjing25@sina.com